

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2010

Martin Myšulka

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zjišťování magnetických vlastností čistých kovů
feromagnetické skupiny
Recognition magnetic properties of bare steels from
ferromagnetic group

Prohlášení

Prohlášení o autorství:

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Podpis s datem odevzdání diplomové práce:

..... Dne 7. května 2010

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Martinovi Markovi, Ph.D. za poskytnutou odbornou pomoc. Dále bych rád poděkoval Ing. Danielovi Petlákově za výrobu vzorků.

Abstrakt

Téma této diplomové práce se zaměřuje na zjištění co možná nejpřesnějších magnetických vlastností čistých feromagnetických kovů.

V teoretické části diplomové práce jsem se s ohledem na zadání zaměřil na stručné shrnutí nejzákladnějších magnetických veličin. Dále je vysvětlena samotná podstata magnetismu a po stručném rozdělení materiálů následuje popis vlastností látek feromagnetických. Navazuje seznámení s měřeními látkami a pojmy související s magnetováním feromagnetik.

Část vlastního měření je zaměřena na samotné zkoumání magnetických vlastností jednotlivých látek. V této části je popsáno složení a princip funkce jednotlivých měřících systémů, které byly použity k měření magnetických vlastností vzorků a také postup přípravy vzorků pro samotné měření. Následuje zhodnocení vlastností jednotlivých vzorků a jejich porovnání.

Klíčová slova

Magnetické vlastnosti, feromagnetismus, permeabilita, susceptibilita, statická hysterezní smyčka, dynamická hysterezní smyčka, stejnosměrné magnetování, střídavé magnetování.

Abstract

Theme of this diploma work survey on recognition what possibly most accurate magnetic properties of bare ferromagnetic metals.

In theoretical part of diploma work I am with reference to submission target in brief summary most basic magnetic quantities. Further is explained substance of magnetism and after brief indicative allocation of materials follows description entirely properties of ferromagnetic materials. Tie together introduce to measured materials plus concepts incidental to magnetization ferromagnetic.

Personal measuring part is specialized to single research of magnetic properties particular materials. In those part is described structure plus principle function single measuring systems that were used to measuring magnetic properties of designs as well as progress sample preparation for alone measuring.

Key words

Magnetic properties, ferromagnetism, permeability, susceptibility, static hysteresis loop, dynamic hysteresis loop, direct magnetizing, alternately magnetizing.

Seznam některých použitých symbolů a značek

Symbol	Název	Jednotka
B	Magnetická indukce	(T)
H	Intenzita magnetického pole	(H)
I	Elektrický proud	(A)
J	Magnetická polarizace	(T)
L	Indukčnost	(H)
M	Magnetizace	(A·m ⁻¹)
N	Počet závitů	(-)
P	Činný výkon	(W)
U	Elektrické napětí	(V)
Φ	Magnetický tok	(Wb)
f	Frekvence	(Hz)
μ ₀	Permeabilita vakua	(4·π·10 ⁻⁷)
μ _r	Relativní permeabilita	(-)
κ	Susceptibilita	(-)

Obsah

Úvod.....	1 -
Teoretická část	
1. Magnetické veličiny a jednotky SI.....	2 -
1.1 Magnetická indukce.....	2 -
1.2 Magnetický tok	2 -
1.3 Intenzita magnetického pole	3 -
1.4 Magnetizace a magnetická polarizace	3 -
2. Magnetické vlastnosti látek a materiálů	4 -
2.1 Magnetické vlastnosti materiálů	6 -
2.2 Kritéria pro vznik feromagnetismu.....	7 -
2.3 Charakteristické znaky feromagnetismu.....	8 -
3. Čisté kovy a jejich vlastnosti.....	10 -
3.1 Železo	10 -
3.2 Nikl	11 -
3.3 Kobalt	12 -
3.4 Titan.....	13 -
4. Základní pojmy a parametry definované při magnetování feromagnetik.....	14 -
4.1 Pojmy a parametry definované při stejnosměrném magnetování feromagnetik. -	14 -
4.2 Pojmy a parametry definované při střídavém magnetování feromagnetik	19 -
5. Měření feromagnetických materiálů	26 -
5.1 Měření magnetizačních charakteristik na uzavřených vzorcích	27 -
5.2 Měření magnetizačních charakteristik na otevřených vzorcích.....	29 -
Část vlastního měření	
6. Výroba vzorků.....	31 -
7. Měřicí systémy	32 -
7.1 REMACOMP C-200	32 -
7.2 REMAGRAPH C-500	37 -
8. Příprava vzorků	41 -
9. Postup měření.....	44 -
10. Výsledky měření	44 -
10.1 Vzorek X.....	46 -

10.2	Kobalt (Co)	- 47 -
10.3	Titan (Ti).....	- 49 -
10.4	Nikl (Ni)	- 50 -
10.5	Nikl – titan (NiTi).....	- 51 -
10.6	Železo (Fe).....	- 53 -
10.7	Nikl - elektrolytický (Ni).....	- 54 -
10.8	Určení vzorku X	- 55 -
10.9	Porovnání vzorků niklů.....	- 56 -
10.10	Porovnání vybraných vzorků.....	- 57 -
Závěr		- 61 -
Seznam použitých zdrojů		- 62 -
Seznam příloh na CD		- 63 -

Úvod

Zjišťování magnetických vlastností látek a materiálů je širokou a komplikovanou problematikou v oblasti měření. Je totiž nutné mít k dispozici specifické měřicí systémy, znalosti principů elektromagnetismu, ale také určité znalosti z oblasti měřených materiálů a jejich vzájemném vlivu při vzniku směsí.

I přestože látky, jejichž magnetické vlastnosti se v této diplomové práci zjišťují, se jako čisté v praktickém užití téměř nepoužívají, je například železo nejdůležitějším technickým kovem současnosti a to zejména jeho slitiny. I ostatní z látek jsou velmi významné, a to jako přímíseniny, které velmi ovlivňují vlastnosti vyráběných materiálů požadovaným směrem. Právě z důvodu toho, jak daná látka ovlivní konečný produkt, je znalost co nejpřesnějších vlastností těchto výchozích látek velmi důležitá.

Jak již ukazuje samotný název diplomové práce, je zaměřena na látky feromagnetické. Ty lze díky svým vlastnostem, zejména vysokými hodnotami magnetizace, považovat za nejdůležitější magnetické materiály v oblasti elektrických strojů a přístrojů.

Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem je práce strukturována do teoretické části práce. Ta je zaměřena na objasnění magnetických veličin, magnetických vlastností látek a to zejména feromagnetických a také na pojmy, se kterými je možno se setkat při procesu magnetování. Samozřejmou součástí je i popis základních vlastností jednotlivých látek, které jsou předmětem zkoumání této práce. V části vlastního měření jsou popsány měřicí systémy, úprava vzorků a prezentace výsledků měření magnetických vlastností.

Teoretická část

1. Magnetické veličiny a jednotky SI

Soustava SI vychází z Maxwellových rovnic. U nás byla uzákoněna v roce 1975. Následující veličiny jsou základními veličinami magnetismu.

1.1 Magnetická indukce

Magnetická indukce se značí \underline{B} . Její jednotkou je 1 T (Tesla), jež je pomocí základních jednotek vyjádřena jako $1 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$. Je to vektorová veličina, pro kterou platí vzorec

$$\underline{F} = I \cdot [\underline{l} \times \underline{B}]; \quad F = B \cdot I \cdot l \text{ [N; A, m, T]} \quad (1)$$

Ze vzorce je patrné, že magnetická indukce je popsána silou, která působí na vodič, kterým prochází elektrický proud.

Rozsah měřených hodnot indukci je velmi široký. Celkový rozsah je asi od 10^{-14} T až do 10^2 T:

- Povrchy permanentních magnetů – 0,2 T až 0,6 T
- Feromagnetika - přibližně 1,5 T až 2 T
- Supravodivé cívky – lze dosáhnout 10 T až 20 T

Oblasti v okolí krajních hodnot jsou ovšem jen stěží dosažitelné a vyžadují si jak speciální zařízení pro generování polí, tak i zvláštní měřicí uspořádání.

1.2 Magnetický tok

Magnetický tok se značí ϕ . Jeho jednotkou je 1 Wb (Weber), což je vlastně $1 \text{ V} \cdot \text{s}$. Magnetický tok lze definovat jako

$$\phi = \iint_S \underline{B} \cdot d\underline{S} = \iint_S B_n \cdot dS \text{ [Wb; T, m}^2\text{]} , \quad (2)$$

kde B_n je složka \underline{B} kolmá k ploše dS .

Pokud je vektor \underline{B} kolmý k ploše S a zároveň platí, že pole je homogenní, můžeme vzorec zjednodušit na

$$\phi = B \cdot S \text{ [Wb; T, m}^2\text{]} . \quad (3)$$

Platí také, že tok vycházející z uzavřené plochy je pokaždé roven nule. Vyplývá to z toho, že magnetické pole má vždy vírový charakter, ve kterém se nevyskytují zřídla toku. Platí tedy

$$\oint_S \underline{B}_n \cdot d\underline{S} = 0 . \quad (4)$$

1.3 Intenzita magnetického pole

Intenzita magnetického pole se značí H . Je to vektorová veličina, jejíž jednotkou je $1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$. Intenzita magnetického pole se vypočítá podle vzorce

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} \text{ [A} \cdot \text{m}^{-1}; \text{A, m]} . \quad (5)$$

Intenzita magnetického pole souvisí s indukcí, a to vztahem

$$\underline{H} = \frac{\underline{B}}{\mu \cdot \mu_0}; \quad \underline{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \underline{H} , \quad (6)$$

kde μ je poměrná (relativní) permeabilita prostředí. Je to bezrozměrné číslo, pro vakuum a prakticky i pro vzduch je $\mu = 1$.

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ je magnetická konstanta (permeabilita vakua).

1.4 Magnetizace a magnetická polarizace

Obě veličiny vyjadřují změny pole, které jsou vyvolány magnetickými vlastnostmi látek. Pro vakuum a v podstatě i pro vzduch jsou tyto veličiny nulové.

Magnetizace je označována \underline{M} . Je to vektorová veličina s jednotkou $1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$. Vyjadřuje z fyzikálního hlediska intenzitu pole uvnitř tělesa, přičemž tato intenzita je vyvolána magnetickými vlastnostmi daného tělesa.

Magnetizace je dána definovanou vztahem

$$\underline{M} = \frac{\underline{B}}{\mu_0} - \underline{H} \text{ [A}\cdot\text{m}^{-1}; \text{T, H}\cdot\text{m}^{-1}, \text{A}\cdot\text{m}^{-1}] \quad (7)$$

Magnetická polarizace se značí \underline{J} a je to vektor, který má základní jednotku 1 T. Magnetická polarizace je vlastně změna indukce, které je vyvolána magnetickými vlastnostmi tělesa.

Vypočítá se podle vztahu

$$\underline{J} = \underline{B} - \mu_0 \cdot \underline{H} \text{ [T; T, H}\cdot\text{m}^{-1}, \text{A}\cdot\text{m}^{-1}] \quad (8)$$

Z obou předešlých vzorců je patrné, že mezi oběma veličinami platí vztah

$$\underline{J} = \mu_0 \cdot \underline{H} \text{ [T; H}\cdot\text{m}^{-1}, \text{A}\cdot\text{m}^{-1}] \quad (9)$$

Při měření parametrů feromagnetik je magnetická polarizace \underline{J} jedním z důležitých parametrů. Ze vztahu (8) a (9) můžeme také napsat

$$\underline{J} = \underline{B} - \mu_0 \cdot \underline{H} = (\mu - 1) \cdot \mu_0 \cdot \underline{H} = \kappa \cdot \mu_0 \cdot \underline{H} \quad (10)$$

$$\kappa = \mu - 1$$

kde μ je relativní permeabilita

κ susceptibilita

Přičemž **relativní permeabilita** a **susceptibilita** jsou základními parametry, podle kterých se látky řadí do jedné ze skupin (paramagnetické, feromagnetické, diamagnetické).

Tato kapitola byla převzata z literárního zdroje [1].

2. Magnetické vlastnosti látek a materiálů

Pro porozumění magnetickým vlastnostem látek je účelné vytvořit nejprve představu o podstatě magnetismu. Nejdříve je účelné si vytvořit představu o atomu.

Atom se skládá z kladně nabitého jádra, v němž je soustředěna prakticky celá jeho hmota, a ze záporných elektronů, jež obíhají kolem jádra po určitých drahách. Je-li počet kladných nábojů jádra stejný, jako elektronů (záporných nábojů), atom jako celek je elektricky neutrální. Počet nábojů v jádře, a tedy i elektronů v atomovém obalu, pro každý prvek je dán jeho atomovým

číslem. Podle toho např. atom vodíku, jenž má atomové číslo 1, je tvořen jádrem a jediným obíhajícím elektronem. [2]

Pokud se počet nábojů jádra a elektronů liší, atom jako celek již není elektricky neutrální. Takové atomy nazýváme *ionty*. Pokud je počet kladných nábojů větší než elektronů, mluvíme o *kladném iontu* neboli kationtu. Pokud je naopak počet elektronů vyšší než kladných nábojů jádra, mluvíme o *záporném iontu* neboli aniontu. Počet elektronů, které je atom schopen buď odevzdat, nebo přijmout určuje *mocenství iontů*. [2]

Elektrony v atomech se pohybují po určitých drahách (orbitalech), jejichž polohy jsou určeny *kvantovými čísly*. Každá dráha představuje zároveň energetickou hladinu, přičemž platí, že čím je orbital blíže jádru, tím větší silou je elektron vázán k jádru. Kvantová čísla orbitalů bývá zvykem označovat písmeny K, L, M, N, ... Tyto hladiny nejsou vždy jednoduché, ale rozpadají se na dvě, popř. na více vedlejších hladin, k jejichž označení se používá obvykle malých písmen (*s, p, d, f*). Směrem od jádra následují další energetické úrovně a dráhy elektronů, které jsou označeny: *1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d, 4s, 4p, 4d, 4f, 5s* atd. Číslice značí číslo hlavní hladiny (*n*) a písmeno hladinu vedlejší. Každá hladina může obsahovat jen určitý počet elektronů. Pro vedlejší hladiny je počet elektronů dán výsledným číslem vzorce $2 \cdot (2 \cdot l + 1)$, kde *l* je vedlejší kvantové číslo příslušné této hladině. [2]

Elektrony se snaží umístit v orbitalech co nejbližších jádru, protože je to z energetického hlediska nejvýhodnější. Existují ovšem prvky, u kterých není některý z vnitřních orbitalů zcela zaplněn. Tyto prvky se nazývají přechodné. Mezi přechodné prvky se řadí také feromagnetické prvky: železo, kobalt a nikl. [2]

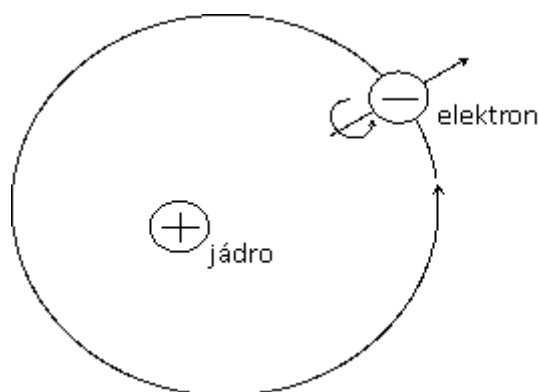
Toto zvláštní uspořádání elektronů se projevuje na magnetismu atomů. Magnetický moment atomu se skládá:

- z momentu atomového jádra,
- z dráhových (orbitálních) momentů elektronů (pohyb elektronů po orbitalech),
- ze spinových momentů elektronů (pohyb elektronů kolem své osy). [3]

Jednotlivé momenty jsou schematicky znázorněny na obr. 1. Magnetický moment jádra je oproti zbylým dvěma zanedbatelný. Měřítkem pro dráhové a spinové momenty elektronů je Bohrov magneton

$$\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2 , \quad (11)$$

který se vypočítá z náboje a hmoty elektronu a Planckovy konstanty *h*. Magnetické momenty elektronů souvisejí tedy přímo s jejich momenty hybnosti. [3]

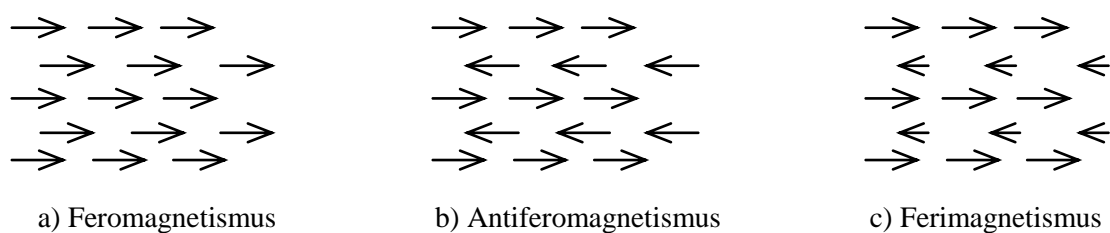


Obr. 1: Znáznornění momentů atomu

2.1 Magnetické vlastnosti materiálů

Magnetické vlastnosti materiálů a látek se posuzují podle jejich chování ve vnějším magnetickém poli, ve kterém látka vykazuje jednu z vlastností:

- A. Diamagnetismus – což je vlastnost atomů, která není závislá na uspořádání elektronů. Toto platí pro všechny látky (pevné, kapalné, plynné). Projevem diamagnetismu je vytlačování dané látky z vnějšího pole, pokud ovšem není tento jev překonán jevem silnějším.
- B. Paramagnetismus – což je vlastnost, která se projevuje také u všech typů látek bez ohledu na jejich uspořádání (pevné, kapalné, plynné). Projevuje se u atomů s volnými nevykompenzovanými magnetickými momenty. Jejím charakteristickým znakem je slabé vtahování do vnějšího pole.
- C. Feromagnetismus – se projevuje stejně jako paramagnetismus u atomů s volnými nevykompenzovanými magnetickými momenty, ovšem navíc musí látky splňovat podmínku určitého poměru mezi atomovou vzdáleností a poloměrem elektronové slupky. Tato vlastnost se projevuje pouze u látek v pevném stavu.
 - I. Antiferomagnetismus – je charakteristický menším poměrem mezi atomovou vzdáleností a poloměrem elektronové slupky, díky čemuž vzniká antiparalelní spinová vazba. Svým chováním ve vnějším magnetickém poli se látky s touto vlastností podobají látkám paramagnetickým.
 - II. Ferimagnetismus – se projevuje u látek s asymetrickou krystalovou mřížkou, v důsledku čehož vzniká antiparalelní spinová vazba s momenty různě velkými. Chováním ve vnějším poli se podobají látkám feromagnetickým, ovšem projevují se méně výrazně. [3]



Obr. 2: *Vzájemné působení spinů uvnitř atomu*

Látky se do těchto skupin dělí podle toho, která z vlastností u nich převažuje. Přehled základních vlastností jednotlivých látek je v tab. 1. Z tabulky vyplývá, že základními parametry pro zařazení materiálu do určité skupiny je jeho permeabilita a susceptibilita (více o těchto parametrech v kapitole: Magnetické veličiny a jednotky SI). [4]

Tab. 1: *Charakteristické vlastnosti materiálů*

	diamagnetická	paramagnetická	feromagnetická
Relativní permeabilita	$\mu_{\text{dia}} < 1$	$\mu_{\text{para}} > 1$	$\mu_{\text{fero}} \gg 1$; $\mu_{\text{fero}} = f(H)$
Relativní susceptibilita	$\kappa_{\text{dia}} < 0$	$\kappa_{\text{para}} > 0$	$\kappa_{\text{fero}} \gg 0$; $\kappa_{\text{fero}} = f(H)$

Vzhledem k tomu, že látky diamagnetické a paramagnetické se liší pouze znaménky, řadí se obě k látkám slabě magnetickým, zatímco feromagnetické látky se projevují jako silně magnetické.

S ohledem na zadání této práce jsou další kapitoly zaměřené zejména na vlastnosti látek feromagnetických.

2.2 Kritéria pro vznik feromagnetismu

Pro feromagnetismus je nezbytným předpokladem, aby atomy, z nichž je feromagnetikum složeno, měly magnetický moment. Jak je popsáno výše, výsledný magnetický moment atomu může být způsoben buď orbitálními, nebo spinovými momenty, popř. oběma druhy momentů společně. Na základě magnetomechanických pokusů bylo zjištěno, že momenty podmiňující feromagnetický stav látky jsou vyvolány z největší části spinem elektronů, zatímco orbitální momenty elektronů bývají téměř zcela vykompenzovány. [2]

Jsou-li energetické hladiny atomu plně obsazeny, spinové momenty elektronů se vzájemně vykompenzují. I při výskytu nevykompenzovaného elektronu na vnější hladině, dojde nanejvýš ke slabému paramagnetismu. Feromagnetismus se vyskytuje jen u prvků, kde není plně obsazena jedna z vnitřních energetických hladin. U atomů železa, kobaltu a niklu není plně obsazena hladina $3d$, u gadolinia je to hladina $4f$. Stejnou podmínku ovšem splňují i atomy ostatních přechodných prvků, které však nejeví feromagnetické vlastnosti, ale jen

paramagnetické. Proto je nutné zavést další podmínku feromagnetismu prvků. Ta souvisí s účinky vnitřního molekulárního pole. Toto pole působí, že se v určitých oblastech feromagnetika staví magnetické momenty atomu paralelně. Podstatou je existence výměnných sil, které mají kvantovou povahu, jež působí mezi elektrony sousedních atomů. Výměnné síly značně převyšují účinek sil magnetických, kterými na sebe působí elektrony vzájemně. Výměnná energie E_v se dá určit z hodnoty Curieovy teploty podle vztahu

$$E_v = \left(\frac{2 \cdot k}{z} \right) \cdot T_c , \quad (12)$$

kde k je Boltzmanova konstanta,
 z je koordinační číslo (stanoví počet nejbližších sousedů atomu v krystalové mřížce).
 [2]

Výměnná energie závisí zejména na vzdálenosti atomů, mezi jejichž elektrony dochází k interakci. Pokud je tato vzdálenost výrazně vyšší, než vzdálenosti obvyklé pro uspořádání atomů v krystalu (plynné látky), výměnné síly jsou tak malé, že nemůže dojít k paralelní orientaci magnetických momentů a látka se chová jako paramagnetikum. Dojde-li k přiblížení atomů na vzdálenost, která je v krystalových mřížkách, začnou se spiny působením výměnných sil orientovat paralelně. Tento jev se nazývá *kladná interakce*. Budou-li se atomy stále více přibližovat, výměnné síly neustále porostou po určitou kritickou vzdálenost a poté dojde k postupnému poklesu výměnných sil až k nule. Při dalším přiblížení se začnou spiny orientovat antiparalelně. [2]

Poměr mezi výměnnými silami a poloměrem vnitřní neúplně obsazené hladiny je u feromagnetických prvků větší než u prvků paramagnetických (s nezaplněnými vnitřními hladinami). Tento poměr je u feromagnetických prvků větší než 3 (3,96 – nikl; 6,20 – gadolinium). Pro existenci feromagnetismu tedy nestačí shluk atomů jakéhokoliv druhu, ale je nutné pravidelné uspořádání atomů do krystalové mřížky. Aby látka mohla být feromagnetickou, musí mít krystalickou strukturu, aby byl zaručen konstantní poměr mezi výměnnými silami a poloměrem vnitřní neúplně obsazené hladiny. [2]

2.3 Charakteristické znaky feromagnetismu

V Mendělejevě periodické soustavě jsou dnes za pokojové teploty známy čtyři feromagnetické prvky: železo (Fe), kobalt (Co), Nikl (Ni) a gadolinium (Gd), které zastupují asi jen 4% prvků, a přesto jsou díky svým magnetickým vlastnostem daleko významnější, než početnější skupiny látek diamagnetických a paramagnetických. Tyto prvky ovšem nejsou jediné materiály, které vykazují feromagnetické vlastnosti. Feromagnetismus vykazuje nejen velké množství slitin a sloučenin složených obsahujících feromagnetické prvky, ale také slitiny a sloučeniny, které feromagnetické prvky neobsahují. [2]

Feromagnetické látky mají některé společné vlastnosti s látkami paramagnetickými. Například v nepřítomnosti vnějšího magnetického pole mají atomy (popř. ionty) prvku magnetický moment různý od nuly, přičemž velikost tohoto momentu je u feromagnetických a paramagnetických materiálů prakticky stejná. Od toho se odvíjí i kladné hodnoty susceptibility a permeability pro oba druhy materiálů. Pro oba druhy látek také platí stejná závislost magnetizace na teplotě (klesající), nebo i závislost magnetizace na intenzitě magnetujícího pole. U obou druhů látek je ovšem rozdílný mechanismus průběhu těchto závislostí. [2]

Feromagnetické látky mají několik charakteristických rysů, kterými se od ostatních látek liší:

1) Feromagnetika dosahují snadno nasycení.

Nasyčené feromagnetikum je taková hodnota magnetizace, kdy dalším zvyšováním intenzity pole již v podstatě nedochází k jejímu zvyšování. Nasycení se u feromagnetik dosahuje snadno vyrobitelnými poli. Od toho se odvíjí i značně vysoké hodnoty susceptibility, resp. permeability ve srovnání s paramagnetiky. Rozdíly susceptibility paramagnetických a feromagnetických látek se pohybují v několika řádech (paramagnetické látky dosahují 10^{-6} až 10^{-3} ; feromagnetické látky až 10^5). [2]

2) Magnetizace feromagnetik není lineární funkcí intenzity pole.

Od této podmínky se odvíjí i hodnoty susceptibility, popř. permeability, které závisí na poli. [2]

3) Magnetizace feromagnetik nezávisí pouze na intenzitě pole.

Magnetizace nezávisí jen na intenzitě pole působící na daný materiál, ale podstatný vliv mají také předchozí magnetizační děje. To znamená závislost na již proběhnutých magnetizačních dějích, které ovlivňují další magnetizační pochody. [2]

4) Feromagnetické vlastnosti jsou vázány jen na určitý obor teplot.

Se vzrůstající teplotou feromagnetismus látky postupně klesá a při určité teplotě (Curieově) zcela zaniká. Přesáhne-li teplota Curieův bod, látka se stane paramagnetickou. [2]

Nejspolehlivějšími ukazateli feromagnetických látek jsou vlastnost snadného nasycení látky a existence Curieovy teploty. U dalších dvou ukazatelů mohou nastat pro různé materiály větší či menší odchylky. To se týká například látek o permeabilitě blízké 1, kde jsou magnetizace jen o málo vyšší, než u silných paramagnetických látek. [2]

Feromagnetismus se vyskytuje výhradně u látek pevných, které se vyznačují krystalickou stavbou, tzn. s určitým pravidelným rozložením atomů (iontů) v prostoru a tvořícími krystalové

mřížky. Proto se feromagnetismus vyskytuje převážně u kovů. Existují ovšem i feromagnetické nekovy, ať už jsou to permanentní magnety zhotoveny z magnetitu, nebo uměle připravené oxidové látky podobné složením magnetitu, které se nezývají ferity. [2]

3. Čisté kovy a jejich vlastnosti

3.1 Železo

Vlastnosti

Železo je polymorfní kov. Má dvě krystalograficky odlišné modifikace, a to modifikace α a γ . Modifikace α je stabilní fáze, která existuje ve dvou teplotních rozmezích. V oblasti vysokých teplot se označuje jako modifikace δ . Železo α při vyšších teplotách ztrácí svoje feromagnetické vlastnosti a to v Curieho bodě, kdy se stává paramagnetické (760 °C). Tato paramagnetická modifikace se někdy označuje jako modifikace β . Modifikace α a δ mají krystalovou mřížku kubickou, prostorově centrovanou. Modifikace γ má mřížku kubickou, plošně centrovanou. Při velmi vysokých tlacích se jako stálá vyskytuje hexagonální modifikace železa označovaná ϵ . [6]

Čisté železo je velmi měkké, dobře tvárné, má malou pevnost a nemá výraznou mez průtažnosti; svými mechanickými vlastnostmi se podobá jiným čistým kovům. Ale již velmi malé množství příměsí mění výrazně jeho vlastnosti. Na mechanické vlastnosti železa má značný vliv také velikost zrna. [6]

Vliv přímísenin na vlastnosti

Nejvýznamnější přímíseninou železa je uhlík. Jelikož jsou atomy uhlíku malé, zaplňují prázdná místa základní mřížky atomu. Roztoky uhlíku:

- v α železe jsou ferity,
- v γ železe jsou austenity.

Pokud je ovšem uhlík v železe ve větším množství, než je jeho rozpustnost, vznikají karbidy, případně grafity. Slitiny s obsahem uhlíku do 2,14% jsou nazývány oceli. Slitiny s větším množstvím uhlíku se nazývají litiny, které se dělí podle formy, ve které se v nich uhlík vyskytuje. [6]

Použití

Železo je nejdůležitější technický kov. Využívá se zejména jeho slitiny, které se nazývají oceli. Používají se jako běžný konstrukční a stavební materiál. Z železa se vyrábí také magnety

používané při výrobě transformátorů, motorů, generátorů, apod. Chudé rudy železa se používají k výrobě oxidů železa používaných ve sklářském průmyslu, výrobě portlandského cementu, k výrobě barev, nebo jako přídavek ke slévarenským pískům atd. Další sloučeniny železa se používají například při výrobě kamenců, nebo jako antidetonační přísada do benzínu. [6]

3.2 Nikl

Vlastnosti

Nikl je kov bílé barvy, poměrně tvrdý a dobře leštitelný. Za zvláštních okolností může nikl krystalizovat v hexagonální soustavě. Nikl s hexagonální krystalickou stavbou je až po teplotu 300 °C nemagnetický. Poté se mění ve feromagnetický nikl s krystalickou stavbou kubickou, plošně centrovanou. [5]

Curieho bod čistého niklu leží při 357 °C. Jeho poloha je do značné míry ovlivňována čistotou niklu. Různé přísady nebo přímíseniny snižují teplotu Curieho bodu, jedině železo a kobalt ji zvyšují. V magnetickém poli mění nikl svoje rozměry v závislosti na intenzitě magnetického pole H . Tento jev se nazývá magnetostrikce. [5]

Měrný odpor čistého niklu se se stoupající teplotou rychle zvyšuje až po teplotu Curieho bodu. Tepelná vodivost čistého niklu se za zvýšené teploty snižuje až po teplotu Curieho bodu, potom opět vzrůstá. Také ostatní fyzikální vlastnosti niklu, jako je měrné teplo, tepelná roztažnost, mají v oblasti Curieho bodu výrazné anomálie. [5]

Mechanické vlastnosti niklu jsou do značné míry ovlivňovány čistotou niklu, ale také jeho předchozím technologickým zpracováním a teplotou. Nikl má vysoký modul pružnosti v tahu a podobá se jím nejvíce oceli. Až do teploty 400 °C se pevnostní vlastnosti niklu mění jen málo, ovšem za vyšších teplot pevnost niklu rychle klesá. [5]

Vliv přímísenin na vlastnosti

Rozpustnost síry v niklu je velmi malá. Obvykle se udává 0,005 %. Při vyšším obsahu tvoří nikl se sírou eutektikum za teploty 645 °C. To je umístěné mezi zrna a zhoršuje výrazně zejména tvárnost za tepla. Nepříznivě působí také atmosféry obsahující sirné sloučeniny, protože ty difundují snadno do niklu a vyvolávají jeho křehkost. Nepříznivý vliv síry eliminuje mangan, který ji váže na MnS. [5]

Křemík se částečně v niklu rozpouští a působí, podobně jako mangan, na odsiřování taveniny tím, že váže kyslík a uvolňuje tak mangan pro reakci se sírou. Křemík zlepšuje částečně mechanické vlastnosti a ovlivňuje vlastnosti fyzikální (zejména snižuje Curieho teplotu). Také má příznivý vliv na korozní odolnost niklu. [5]

Uhlík v tuhém stavu je v niklu jen omezeně rozpustný, což vede k segregaci grafitu na hranicích zrn. To působí na snižování pevnosti a meze tečení za tepla. Má-li být použit nikl pro teploty 300 až 600 °C, musí být obsah uhlíku nižší než 0,02%, což je také spodní hranice jeho rozpustnosti v niklu. Jinak působí uhlík příznivě na mechanické vlastnosti, zvyšuje zpevnění niklu po tváření za studena. [5]

Železo, kobalt a měď, které obvykle provázejí nikl jako přímíseniny, nemají na vlastnosti niklu podstatný vliv. [5]

Použití

Největší část niklu se spotřebuje jako přísada k slitinovým ocelím. Zbývající část se používá na různé slitiny a na polotovary z čistého niklu, popř. anody pro poniklování. Jako konstrukční materiál se uplatňuje ve stavbě různých energetických zařízení. V elektrotechnice se setkáváme s niklem v konstrukci různých elektronek a jiných slaboproudých a silnoproudých zařízení. Vysoký teplotní součinitel odporu niklu je možno s výhodou využít v konstrukci regulačních odporů a odporových teploměrů. Určité množství se spotřebuje také k výrobě niklových alkalických akumulátorů. [5]

3.3 Kobalt

Vlastnosti

Kobalt je polymorfní kov bílé barvy, který se svými vlastnostmi nejvíce podobá železu. Curieho teplota je 1125 °C. Za normální teploty krystalizuje kobalt β v soustavě hexagonální. Při teplotě 417 °C překrystalizuje kobalt v modifikaci α , která je kubická, plošně centrovaná. S ohledem na malé překrystalizační teplo dochází snadno při přeměně k přechlazení nebo přehřátí výchozí fáze, a tak se stává, že obě fáze existují vedle sebe v určitém rozsahu teplot. Přeměny, ke kterým při ohřevu dochází, neovlivňují feromagnetické vlastnosti kobaltu. [5]

Tvářením za studena se rychle zpevňuje. Za stoupající teploty se snižují mechanické vlastnosti kobaltu jen málo, a proto působí kobalt příznivě na vlastnosti žárovevných slitin, ve kterých se vyskytuje jako přísada. Nemá však příliš vysokou žáruvzdornost. [5]

Vliv přímísenin na vlastnosti

Mechanické vlastnosti kobaltu jsou ovlivňovány nečistotami, jako je uhlík, síra, křemík a mangan, a proto je u kobaltu nutný údaj o čistotě. [5]

Nečistoty jako uhlík, železo, nikl, snižují podstatně teplotu fázové přeměny a působí rovněž na snížení teplot martenzitické přeměny. [5]

Použití

Kobalt je důležitý přísadový prvek slitin. Jsou to zejména slitiny o vysoké tvrdosti a odolnosti proti otěru, slitiny žárovebné a slitiny se zvláštními vlastnostmi. [5]

Slitiny kobaltu se železem mají na rozdíl od slitin ostatních kovů zcela zvláštní vlastnosti. Za koncentrace 40 až 45 % Fe mají maximální elektrickou a tepelnou vodivost a za koncentrace 60 až 65 % Fe mají největší magnetické sycení ze všech známých kovů, čehož se s výhodou užívá při výrobě magnetů, závaží, chemických přístrojů, leteckých motorů apod. [5]

3.4 Titan

Vlastnosti

Titan je polymorfní kov bílé barvy. Je velmi tvrdý a lehký, který je velmi odolný proti korozi. Z hlediska korozních vlastností předčí někdy i nerezavějící oceli. Je-li dokonale vyleštěn, odolává za laboratorní teploty i kyselinám. Řadí se mezi kovy s vysokou teplotou tání (1667 °C). Vyskytuje se v modifikacích α a β , přičemž překrystalizační teplota je 882 °C. V modifikaci α má titan krystalovou mřížku hexagonální, v modifikaci β má mřížku kubickou, plošně centrovanou. V modifikaci α vzniká při tváření, podobně jako u jiných kovů, výrazná textura, kterou lze technologickými postupy výrazně omezit, ovšem nelze ji odstranit úplně. [5]

Titan má malou odolnost proti otěru a vysoký koeficient tření oproti ostatním kovům. Nepříznivý je i sklon k zadírání a místnímu svařování titanu. Vysoká pevnost titanu má za následek i horší obrobiteľnost. Svařitelnost titanu je dobrá při použití ochranné atmosféry. Použití ochranné atmosféry je nutné i téměř ve všech případech při pájení titanu. [5]

Vliv přímísenin na vlastnosti

Obvyklou nečistotou technického titanu je železo. Jeho obsah kolísá v rozsahu 0,1 % až maximálně 0,3 %. Příměs železa zvyšuje pevnost a tvrdost titanu, ovšem zhoršuje zároveň tvárnost. [5]

Uhlík se v titanu rozpouští jen omezeně. Při obsahu vyšším než 0,25 % tvoří s titanem karbid titanu. Výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti již při malém obsahu. Uhlík má vliv i na svařitelnost titanu, a proto je jeho obsah udržován na velmi nízké úrovni. [5]

Kyslík a dusík se vyznačují dobrou rozpustností v obou fázích titanu. Modifikaci α přitom stabilizují. Zvyšují pevnost, tvrdost a mez pružnosti. Zhoršují ovšem houževnatost a tažnost titanu. Vliv dusíku je intenzivnější. Obvykle jejich obsah dosahuje maximálně 0,15 %. [5]

Použití

Výroba titanu je velmi finančně náročná, a proto je ve většině případů využíván pouze tam, kde není možné použití levnějších materiálů. Používá zejména v kosmických aplikacích, dále pak v leteckém průmyslu (potahy supersonických letadel, v konstrukci civilních letadel), ale také například při výrobě chirurgických nástrojů nebo kostních implantátů. Časté je i použití jako materiálů do extrémních korozních podmínek (chemický reaktor). [5]

4. Základní pojmy a parametry definované při magnetování feromagnetik

Pojmy a parametry uvedené v této kapitole se týkají magnetování, tzn. vyvolání polarizace ve vzorku působením vnějšího magnetického pole. Tato kapitola je rozdělena na pojmy a parametry pro stejnosměrné a střídavé magnetování, protože jsou pro ně určující rozdílné parametry. V obou případech je ovšem základním pojmem charakteristika magnetování, tedy závislost $B = f(H)$, resp. $J = f(H)$.

4.1 Pojmy a parametry definované při stejnosměrném magnetování feromagnetik

Magnetování můžeme označit za stejnosměrné, jestliže polarizace \underline{J} , resp. indukce \underline{B} a intenzita pole \underline{H} jsou v čase neměnné, popř. jsou změny tak pomalé, že další zpomalení nemá vliv na měřené veličiny. Parametry naměřené při stejnosměrném magnetování můžeme označit za materiálové konstanty, neboť závisí pouze na složení a zpracování materiálu.

Křivka prvotního magnetování

Vyjadřuje závislost $B = f(H)$. Podmínkou pro tuto křivku je, že výchozím stavem je střed grafu ($H = 0, B = 0$), což odpovídá stavu dokonalého odsmagnetování. Při tomto měření nesmí dojít ke změně nárůstu \underline{H} , tzn. k přeskoku na jinou magnetizační charakteristiku. Tento případ je naznačen čárkovanou čarou obr. 3 (mezi body 1 a 2).

Statická hysterezní smyčka

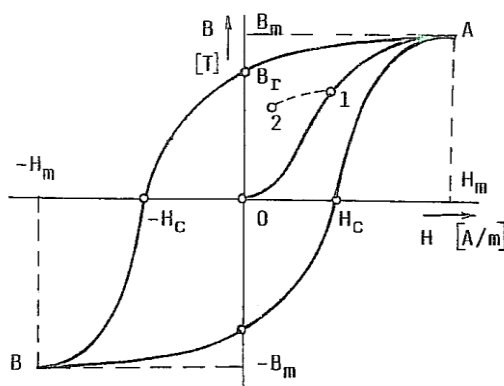
Tato křivka je dána závislostí $B = f(H)$ resp. $J = f(H)$, a to při stejnosměrném magnetování. Typický tvar statické hysterezní smyčky je zobrazen na obr. 3. Z obrázku je vidět, že na statickou hysterezní smyčku lze přejít z křivky prvotního magnetování, a to při poklesu

magnetické indukce v bodě A. Část smyčky ležící mezi body B_r a H_c se nazývá demagnetovací křivka. Křivka $J = f(H)$ se svým tvarem od křivky $B = f(H)$ liší. Porovnání obou křivek je na obr. 4. Vzájemná souvislost mezi křivkami je dána vztahem $J = B - \mu_0 \cdot H$.

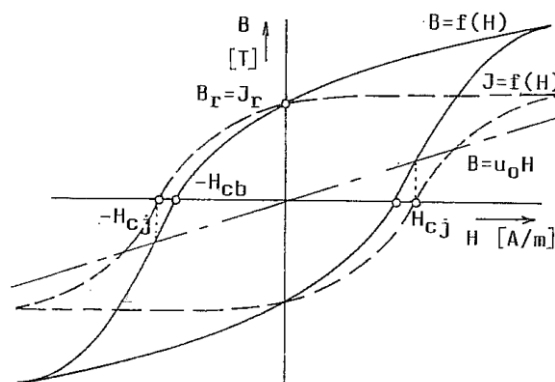
Charakteristika $J = f(H)$ slouží pro určení stavu nasycení. Stav nasycení je stav, kdy i při zvětšování intenzity vnějšího pole již nedochází ke zvětšení polarizace feromagnetika a nedochází již ani ke změně polohy bodů remanentní indukce (B_r) a koercitivní intenzity (H_c). Tato charakteristika se nazývá hraniční (saturační) hysterezní smyčka. Platí, že intenzitě nasycení H_s odpovídá polarizace nasycení J_s a také indukce nasycení B_s .

Na hraniční hysterezní smyčce jsou definovány následující parametry:

- Koercitivní intenzita (Koercivita) se značí H_c (H_{CB}) a je dána průsečíkem hysterezní smyčky $B = f(H)$ s osou H .
- Koercivita (H_{cj}) je dána průsečíkem smyčky $J = f(H)$ s osou H .
- Remanentní indukce (Remanence) se značí B_r resp. J_r je dána průsečíkem smyčky $B = f(H)$ s osou B , resp. $J = f(H)$ s osou J , přičemž platí, že $B_r = J_r$.
- Energetický součin $(B \cdot H)_{\max}$ resp. $(J \cdot H)_{\max}$ [$J \cdot m^{-3}$] je někdy označován také jako maximální energetický součin. Určuje se na demagnetovací části hysterezní smyčky (II. kvadrant). Je to maximum funkce $B \cdot H = f(B)$. Slouží k hodnocení magneticky tvrdých materiálů a představuje dvojnásobek maximální hodnoty hustoty energie daného feromagnetika.
- Komutační křivka je spojnice vrcholů souměrných statických hysterezních smyček. Je souměrná podle počátku a její tvar je velmi blízký tvaru křivky prvotního magnetování. Její měření probíhá při skokových změnách pole, při postupném snižování intenzity magnetického pole od hodnoty H_m .



Obr. 3: Statická hysterezní křivka



Obr. 4: Porovnání křivek $B = f(H)$ a $J = f(H)$

Permeabilita při stejnosměrném magnetování

Relativní (poměrná) permeabilita

Relativní permeabilita je používána, jako základní parametr u feromagnetik. Je dána vztahem

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H} \quad (13)$$

kde μ_0 je magnetická konstanta, $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$

B je magnetická indukce ve feromagnetiku [T]

H je intenzita pole [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$].

Relativní permeabilita je použitelná pro body na křivce prvotního magnetování nebo na komutační křivce. Není tedy použitelná pro body na hysterezní smyčce. Ve většině textů je relativní permeabilita označována zjednodušeně jen permeabilita.

Počáteční permeabilita

Je dána směrnici tečny ke křivce prvotního magnetování v počátku

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \cdot \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \text{tg} \alpha \quad (14)$$

Měřítka B a H musejí být pro výpočet počáteční permeability podle vzorce (14) jednotkové.

Přímé měření počáteční permeability pro hodnotu $H = 0$ není možné. Z tohoto důvodu se používá pro určení μ_i při odmagnetování vzorku vztah

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B'}{H'} , \quad (15)$$

kde H' je smluvená hodnota intenzity pole blízká nule $[A \cdot m^{-1}]$,

B' odpovídající hodnota indukce $[T]$

Smluvené hodnoty H' určují velikost počáteční permeability, jako například:

μ_{08} odpovídá $H' = 0,08 A \cdot m^{-1}$

μ_4 odpovídá $H' = 0,4 A \cdot m^{-1}$

μ_{16} odpovídá $H' = 1,6 A \cdot m^{-1}$.

Maximální permeabilita

Je dána vztahem

$$\mu_m = \frac{1}{\mu_0} \cdot \operatorname{tg} \alpha'' . \quad (16)$$

Je to vlastně směrnice tečny vedené z počátku ke křivce prvotního magnetování.

Diferenciální permeabilita

Je dána vztahem

$$\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H} , \quad (17)$$

kde ΔB a ΔH jsou rozdíly souřadnic dvou bodů tečny vedené ke křivce prvotního magnetování nebo statické hysterezní smyčce.

Vratná (reverzibilní) permeabilita

Je dána směrnici malé hysterezní smyčky, přičemž obě její větve splývají při velmi malých změnách ΔH_1 a ΔB_1 . Vtah pro vratnou permeabilitu má tvar

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B_1}{\Delta H_1} \quad \text{pro } \Delta H_1 \rightarrow 0 \quad (18)$$

Inkrementální permeabilita

Je definována na malé hysterezní smyčce. Předpokladem jsou větší vratné změny ΔH_2 a ΔB_2 . Vypočítá se podle vztahu

$$\mu_{\Delta} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B_2}{\Delta H_2} \quad (19)$$

Součinitel nasycené magnetostrikce

Je definován jako relativní prodloužení odmagnetovaného vzorku po saturaci stejnosměrným polem daného směru:

$$\lambda_s = \frac{\Delta l_s}{l_0} \quad (20)$$

kde Δl_s je prodloužení vzorku při stejnosměrné saturaci [m],
 l_0 rozměr odmagnetovaného vzorku v nulovém poli [m].

Anizotropie

Magnetická anizotropie znamená, že materiál má v různých směrech rozdílné magnetické vlastnosti. Závisí tedy, v jakém směru bude materiál magnetován. Vektor magnetizace má tendenci udržovat orientaci ve směru, kde se materiál magnetuje nejsnadněji. Podle toho je také nazýván „směr snadného magnetování“. V tomto směru má materiál vysokou permeabilitu. Pro pole H_s (anizotropní pole) schopné překonat působení anizotropní energie [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$] platí

$$H_s = \frac{2 \cdot K}{J_s} \quad [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}; \text{J} \cdot \text{m}^{-3}, \text{T}] \quad (21)$$

kde J_s je nasycená polarizace materiálu.

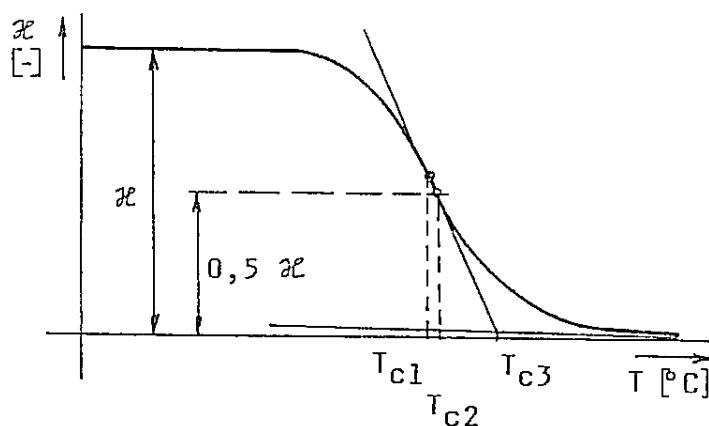
Základní druhy anizotropie jsou:

- Magnetokrystalická - ta bývá většinou dominantní. U permalloyů s obsahem kolem 80% Ni a nulová u amorfních materiálů, které nemají krystalickou mřížku je ovšem velmi nízká.
- Napětíová – bývá vyvolána mechanickým napětím. Je pouze dočasná.
- Jednoosá indukovaná – je vyvolána žiháním v magnetickém poli nebo pod mechanickým napětím. Jelikož vzniká už při výrobě daného materiálu, bývá trvalá.

- Tvarová – je způsobená demagnetizací materiálu.
- Jednoosá, víceosá – je rozdělení podle počtu směrů snadného magnetování.

Curieho teplota

Při této teplotě přechází materiál ze stavu feromagnetického do paramagnetického. Tento přechod bývá většinou plynulý, přičemž se k určení Curieovy teploty (T_C) používá některé z definic patrných z obr. 3. Obrázek vyjadřuje závislost susceptibility feromagnetika na teplotě, přičemž Curieova teplota T_{C1} je určena v inflexním bodě charakteristiky; T_{C2} je potom dána poklesem susceptibility na 50 % a T_{C3} je umístěna v průsečíku tečen vedených k závislosti $\kappa = f(T)$ podle obr. 5.



Obr. 5: Určení Curieho teploty

4.2 Pojmy a parametry definované při střídavém magnetování feromagnetik

Při střídavém magnetování se také udávají charakteristiky $B = f(H)$, z nichž se dále odvozují parametry vzorků. Při střídavém magnetování mají oproti stejnosměrnému veličiny střídavý periodický průběh bez stejnosměrné složky. Parametry měřené při střídavém magnetování závisí na tloušťce plechu a izolaci mezi jednotlivými plechy, proto naměřené parametry platí pro měřený vzorek nebo určitou měřenou skupinu vzorků.

Oproti stejnosměrným veličinám jsou při měření střídavých veličin rozdíly:

- 1) Nelze je popsat jedinou hodnotou, jak je tomu u stejnosměrných. U střídavých veličin jsou měřeny hodnoty maximální, efektivní resp. první harmonické složky, čímž se dosahuje různých charakteristik a parametrů.

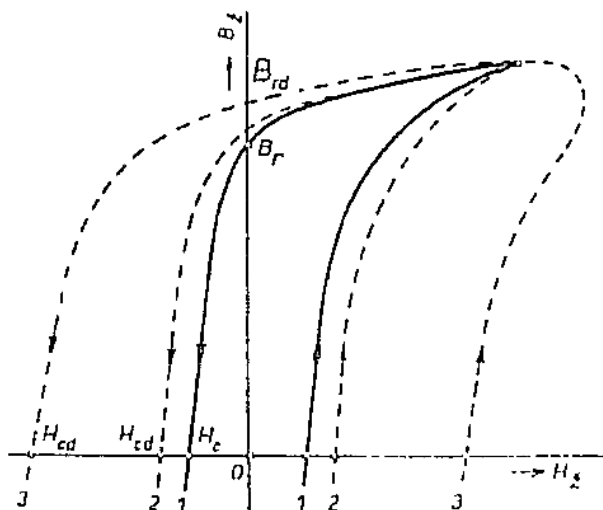
- 2) Charakteristiky při střídavém magnetování jsou závislé na tloušťce plechů, jejich vzájemné izolaci, frekvenci a časovém průběhu indukce B .

Amplitudová magnetizační charakteristika

V této charakteristice jsou vyneseny maximální hodnoty intenzity a indukce $B_m = f(H_m)$. Je shodná s křivkou prvotního magnetování, ovšem za podmínky použití nižších kmitočtů, přičemž se nesmí projevit povrchový jev. Pro vyšší kmitočty se potom liší od křivky prvotního magnetování a závisí zejména na použitém kmitočtu.

Dynamická hysterezní smyčka

Je hlavní charakteristikou měřenou při střídavém magnetování. Udává závislost okamžitých hodnot indukce a intenzity $B_t = f(H_t)$ a její tvar je proto velmi závislý na použité frekvenci. Při nízkých kmitočtech je dynamická smyčka shodná se statickou a se zvyšující se frekvencí se uplatňuje povrchový jev. V důsledku toho se smyčka rozšiřuje a její vrcholy se zaoblují (obr. 6). Na obr. 6 jsou také odečítány koercivita a remanence, které se ovšem označují jako dynamické a značí se H_{cd} , popř. B_{rd} .



Obr. 6: Dynamická hysterezní smyčka

Permeabilita při střídavém magnetování

Permeability definované v této kapitole jsou rozděleny do tří větších skupin, podle způsobu jejich určení. Definice odpovídající kapitole o stejnosměrném magnetování jsou v podkapitole B této části, tedy definice podle pracovní oblasti magnetizační charakteristiky

A. Definice permeabilit s ohledem na způsob určení B a H

Amplitudová permeabilita

Je definována vztahem

$$\mu_a = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_m}{H_m} , \quad (22)$$

kde B_m je maximální hodnota (amplituda) střídavé indukce ve vzorku [T],

H_m je maximální hodnota (amplituda) intenzity pole ve vzorku $[A \cdot m^{-1}]$.

Komplexní permeabilita

Výstupem je komplexní číslo, které je dáno vztahem

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_{1ef}}{H_{1ef}} = \mu' - j \cdot \mu'' , \quad (23)$$

kde B_{1ef} je fázor první harmonické složky indukce, jehož velikost je vyjádřena pomocí efektivní hodnoty [T],

H_{1ef} fázor první harmonické složky intenzity pole, jehož velikost je vyjádřena pomocí efektivní hodnoty $[A \cdot m^{-1}]$,

μ' reálná část komplexní permeability,

μ'' imaginární část komplexní permeability

Imaginární část komplexní permeability μ'' je vždy záporná.

Zdánlivá permeabilita

Je definována jako absolutní hodnota komplexní permeability

$$\mu_{zd} = |\mu| = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_{1ef}}{H_{1ef}} = \sqrt{\mu'^2 + \mu''^2} \quad (24)$$

Místo efektivních hodnot indukce a intenzity lze dosadit do vzorce i maximální hodnoty B_{1m} a H_{1m} .

Ztrátový úhel feromagnetika

Udává zpoždění první harmonické složky indukce \underline{B}_1 proti první harmonické složce intenzity pole \underline{H}_1

$$\delta = \arctg \frac{\mu''}{\mu'} . \quad (25)$$

B. Definice permeabilit podle pracovní oblasti magnetizační charakteristiky

Jsou zde použity stejné definice, jako u stejnosměrného magnetování a podle způsobu určení B a H jsou použity vztahy (22) až (24).

Počáteční permeabilita

Místo vztahu (14) je použita smluvená hodnota H_m , při které je počáteční permeabilita zajišťována. Hodnoty μ_{08} , μ_4 a μ_{16} odpovídají maximální hodnotě intenzity pole $H_m = 0,08; 0,4$ a $1,6 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$. Hodnoty počáteční permeability se udávají jako amplitudové μ_{ia} , nebo jako komplexní μ_i .

Maximální permeabilita

Zjišťuje se z pomoci definičního vztahu (16) z příslušné charakteristiky. Maximální amplitudová permeabilita μ_{ma} se zjišťuje z amplitudové magnetizační charakteristiky $B_m = f(H_{1m})$, zatímco maximální zdánlivá permeabilita μ_{mz} se zjišťuje z charakteristiky $B_{1m} = f(H_{1m})$.

Vratná a inkrementální permeabilita

Jsou definovány při střídavém magnetování se superponovaným stejnosměrným polem, takže magnetovací cyklus probíhá po malých hysterezních smyčkách. Pokud je amplituda střídavé složky pole intenzity větší než 0, jedná se o vratnou amplitudovou permeabilitu μ_{ra} nebo komplexní permeabilitu μ_r . Při větších amplitudách H_m se užívá inkrementální amplitudová $\mu_{\Delta a}$, zdánlivá $\mu_{\Delta z}$ nebo komplexní μ_{Δ} permeabilita.

C. Permeabilita a parametry definované pro vzorky určitého tvaru

Efektivní permeabilita

Tato permeabilita se používá u vzorků z nehomogenních materiálů, složených z různých materiálů nebo obvodů, ve kterých se vyskytují vzduchové mezery. Efektivní permeabilita se

značí μ_e a je to permeabilita hypotetického homogenního materiálu na kterém je rovnoměrné rozložení magnetického toku po průřezu a u něhož by se při stejných rozměrech magnetického obvodu dosáhlo stejné reluktance, jakou má daný obvod.

Toroidní permeabilita

Stanovuje se z indukčnosti vinutí, které je navinuto na toroidním jádře takovým způsobem, aby byly minimální rozptylové tok. Toroidní permeabilita je dána vztahem

$$\mu_t = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{L \cdot l_s}{N^2 \cdot S} , \quad (26)$$

kde L je indukčnost vinutí [H],
 l_s střední délka magnetického obvodu toroidu [m],
 N počet závitů měřicího vinutí,
 S průřez toroidu [m²].

Cívková permeabilita

Je definována vztahem

$$\mu_c = \frac{L}{L_0} , \quad (27)$$

kde L je indukčností cívky s vloženým jádrem [H],
 L_0 indukčnost cívky s vyjmutým jádrem [H].

Součinitel indukčnosti

Je definován vztahem

$$A_L = \frac{L}{N^2} , \quad (28)$$

kde L je indukčností měřicí cívky [H],
 N počet závitů měřicí cívky

Hodnota A_L znamená indukčnost cívky s jedním závitkem.

Ztráty při střídavém magnetování

Ztráty hrají při střídavém magnetování významnou roli. Zmenšení ztrát znamená vysoké energetické a s tím související ekonomické úspory. Jsou významné zejména u magneticky měkkých materiálů.

Energetické ztráty způsobené v jednotkovém objemu materiálu během jednoho magnetizačního cyklu se vypočítají podle vztahu

$$w = \oint H \cdot dB = S_{hd} = \int_0^T H(t) \cdot \frac{dB(t)}{dt} \cdot dt, \quad (29)$$

kde w je měrná energie $[J \cdot m^{-3}]$,

H, B jsou souřadnice bodu dynamické hysterezní smyčky odpovídající okamžitým hodnotám $H(t), B(t)$ v čase t $[A \cdot m^{-1}; T]$,

S_{hd} je plocha uzavřené dynamické smyčky $[J \cdot m^{-3}]$,

T je doba periody (doba trvání magnetizačního cyklu) $[s]$.

Celkové ztráty

Představují činný výkon P $[W]$, který je potřeba k magnetování feromagnetika o objemu V $[m^3]$ při frekvenci f $[Hz]$ a měrné energie w $[J \cdot m^{-3}]$. Vypočtou se podle vztahu

$$P = V \cdot f \cdot w. \quad (30)$$

Měrné ztráty

Jsou vyjádřeny činným ztraceným výkonem na váhovou jednotku materiálu a určí se vztahem

$$Z = \frac{P}{m} \quad (31)$$

kde P je ztracený výkon $[W]$,

m hmotnost feromagnetika $[kg]$.

Pokud je frekvence magnetování 50 Hz a indukce má maximální hodnotu B_m , udávají se měrné ztráty pomocí ztrátového čísla Z_x . Pokud má ztrátové číslo tvar $Z_{1,5}$ znamená to, že měrné ztráty při $B_m = 1,5$ T.

Vyjádření ztrát pomocí ztrátového úhlu δ resp. pomocí ztrátového odporu

Ztrátový úhel feromagnetika δ je definován vztahem (25). Výkon první harmonické dodaný jádru lze vyjádřit ve tvaru

$$P_1 = U_{1ef} \cdot I_{1ef} \cdot \sin \delta \quad [W; V, A], \quad (32)$$

Kde U_{1ef} a I_{1ef} jsou efektivní hodnoty prvních harmonických složek indukovaného napětí a magnetovacího proudu.

Sériový ztrátový odpor R_S je náhradní odpor, v němž se při průchodu první harmonické složky magnetovacího proudu I_{1ef} ztratí výkon

$$P_1 = R_S \cdot I_{1ef}^2 \quad [W; \Omega, A] \quad . \quad (33)$$

Paralelní ztrátový odpor R_P je náhradní odpor, v němž se při efektivní hodnotě první harmonické indukovaného napětí U_{1ef} ztratí výkon

$$P = \frac{U_{1ef}^2}{R_P} \quad [W; V, \Omega] \quad (34)$$

Tyto jednotky vyjadřují pouze výkony prvních harmonických složek proudu resp. napětí, což vylučuje jejich použití při nesinusových průbězích.

Rozdělení ztrát při střídavém magnetování

Ztráty při střídavém magnetování lze rozdělit do tří složek:

- a) Hysterezní ztráty P_h jsou dány vzorci (29) a (30).

$$P_h = V \cdot f \cdot S_{h0} \quad [W; m^3, Hz, J \cdot m^{-3}] \quad . \quad (35)$$

kde V je objem feromagnetika,
 f je frekvence,
 S_{h0} je plocha statické hysterezní smyčky.

Hysterezní ztráty je možno snížit tak, že zmenšíme koercivitu H_c a tím i plochu statické smyčky S_{h0} .

- b) Ztráty vířivými proudy P_v jsou způsobené vodivostí feromagnetika.

$$P_v = \frac{V \cdot (B_m \cdot f \cdot h)^2}{6 \cdot \rho} \quad [W; m^3, T, Hz, m, \Omega \cdot m] \quad . \quad (36)$$

kde h je tloušťka pásku,
 ρ je rezistivita,
 V je objem.

Tyto ztráty lze zmenšit zejména použitím tenkých izolovaných plechů a také vyšší rezistivitou feromagnetika ρ .

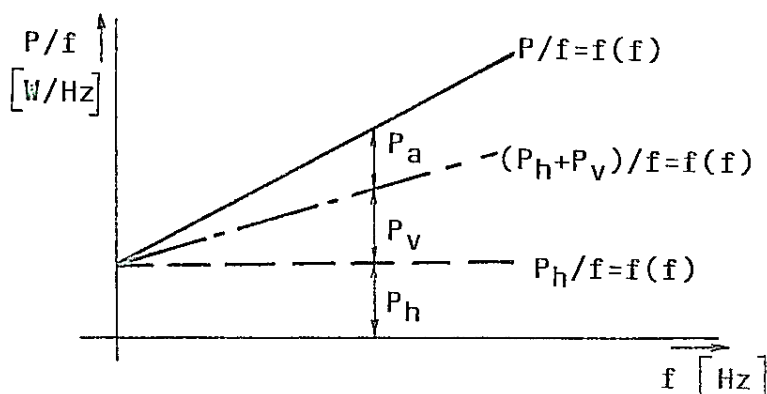
- c) Anomální ztráty P_a jsou způsobené např. vířivými proudy spojenými s pohybem doménových stěn. Frekvenční závislost anomálních ztrát je obecně dána vztahem

$$P_a = k \cdot f^2 . \quad (37)$$

Anomální ztráty lze snížit zjemňováním doménové struktury.

Obecně lze tedy frekvenční závislost ztrát ve feromagnetiku vyjádřit ve tvaru

$$P = k_1 \cdot f + k_2 \cdot f^2 . \quad (38)$$



Obr. 7: Grafické vyjádření jednotlivých složek ztrát ve tvaru $P/f = f(f)$

Tato kapitola byla převzata z literárního zdroje [1].

5. Měření feromagnetických materiálů

Základní parametry feromagnetických materiálů lze vyčíst z jejich magnetovací charakteristiky. Měření popsaná v této kapitole jsou rozdělena na dvě hlavní skupiny, a to na měření na uzavřených vzorcích a měření na otevřených vzorcích. Jednotlivé děje a s tím spojené naměřené hodnoty, popř. další charakteristické rysy, které lze z hlavních charakteristik vypočíst, jsou blíže rozebrány v předchozí kapitole.

5.1 Měření magnetizačních charakteristik na uzavřených vzorcích

Na uzavřených vzorcích se měří pouze magneticky měkké materiály. Uzavřený vzorek vytváří uzavřený magnetický obvod. Ve vzorku lze dosáhnout homogenního pole H_z , pokud je obvod homogenní a vinutí je rozloženo rovnoměrně. Výhodou takovýchto vzorků je, že jsou jen málo citlivé na jiná vnější magnetická pole. Avšak vzorky, které mají vysokou hodnotu permeability a malý průřez, mohou být ovlivněny i zemským magnetickým polem. U uzavřených vzorků lze vypočítat intenzitu pole H_z z magnetizačního proudu I_1 podle vztahu

$$H_z = \frac{N_1 \cdot I_1}{l_s} \quad [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}; \text{A, m}] , \quad (39)$$

kde N_1 je počet závitů magnetického vinutí,

I_1 magnetovací proud,

l_s střední délka siločáry.

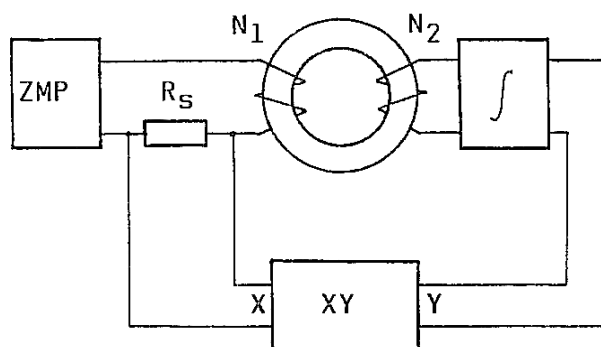
Jako nejvýhodnější se zde jeví vzorky toroidní, a to kvůli určení přesné hodnoty střední délky siločáry. Dalším typem vzorku, který se užívá, je vzorek rámcový.

Měření při stejnosměrném magnetování

Stejnosemřná magnetická měření při použití spojitého magnetování lze realizovat zapojením dle obr. 8.

Pro spojitou regulaci proudu lze použít ručně řízený zdroj, který má jemnou regulaci. Výhodou použití ručně řízeného zdroje je možnost záznamu malých hysterezních smyček, nesouměrných smyček apod. Další možností je použití zdroje, který sám generuje magnetovací proud. V tomto případě je několik možností generování:

1. Magnetování s $dH/dt = \text{konst.}$ Realizace tohoto případu je velmi jednoduchá, kdy ZMP generuje proud trojúhelníkového průběhu. Nevýhodou je dlouhá doba měření, která zvyšuje chybu integrace.
2. Magnetování s proměnnou rychlostí nárůstu proudu. Zde se nastavují 2 rychlosti magnetování tak, aby vyhovovaly měřené charakteristice a zkrátila se doba měření.
3. Magnetování s $dB/dt < \text{konst.}$, $dH/dt < \text{konst.}$ V tomto případě je doba měření optimalizována, avšak zapojení je obvodově složitější. V současné době se využívá PC, které generuje magnetovací proud tak, aby byly splněny požadované podmínky.



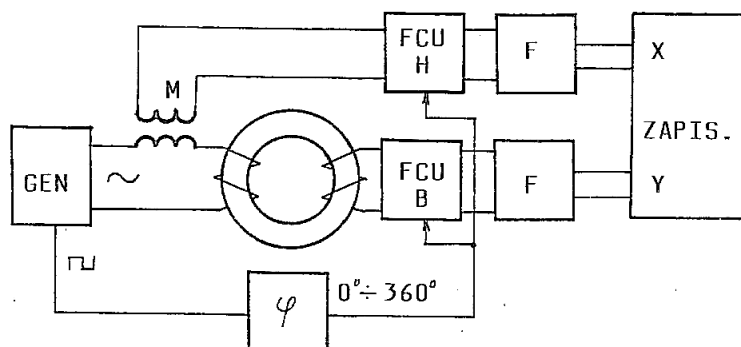
Obr. 8: Zapojení pro měření při stejnosměrném magnetování

Měření při střídavém magnetování

Při střídavém magnetování se pro řízení měřicího systému využívá počítačů, přičemž magnetovací proud může být generován buď autonomním (sinusovým) generátorem, nebo programovatelným generátorem. Vzhledem k tomu, že systémy jsou sestavovány na různých pracovištích podle hardwarových a softwarových možností, není zde žádná univerzální měřicí metoda. Jedním z nejdůležitějších měření při střídavém magnetování je měření dynamické hysterezní smyčky.

Dynamická hysterezní smyčka zobrazuje závislost $B(t) = f(H(t))$, v průběhu magnetovacího cyklu. Dynamickou hysterezní smyčku lze zobrazit několika způsoby:

1. Nejjednodušším způsobem zobrazení dynamické hysterezní smyčky je pomocí osciloskopu
2. Dalším způsobem je pomocí hysterezisgrafu s fázově citlivými usměrňovači (FCU) jehož zapojení je na obr. 9. Nevýhodou tohoto způsobu je, že je použitelný pouze pro souměrné antiperiodické průběhy, tedy pro symetrickou dynamickou hysterezní smyčku.
3. K zobrazení i nesymetrické hysterezní smyčky slouží vzorkovací metoda. Tato metoda dovoluje mimo jiné i softwarové korekce, výpočet a změnu měřítek apod.

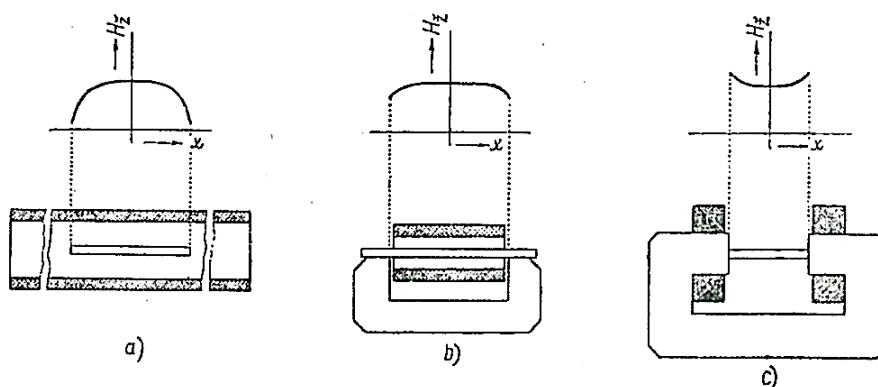


Obr. 9: Zapojení pro měření při střídavém magnetování pomocí hysterezisgrafu

5.2 Měření magnetizačních charakteristik na otevřených vzorcích

U měření na otevřených vzorcích je použito jiné rozdělení metod, a to na měření na magneticky tvrdých a magneticky měkkých materiálech. Při rozdělení metod u uzavřených vzorků nemělo toto rozdělení využití, neboť měření magneticky tvrdých uzavřených vzorků nemá fyzikální význam. Na otevřených vzorcích přichází u magneticky tvrdých materiálů v úvahu pouze měření stejnosměrné. Na magneticky měkkých materiálech přicházejí v úvahu měření stejnosměrná, tak i střídavá.

U otevřených vzorků je měření materiálu obtížnější než u vzorků uzavřených. Je to způsobeno nehomogenitou pole, tedy nerovnoměrným rozložením intenzity magnetického pole podél vzorku. Na obr. 10 je znázorněno rozložení intenzit polí tyčových vzorků magnetovaných ve vzduchové cívce (a). Dál ve jhu, kdy je magnetovací cívka uložena na vzorku (b) a jsou-li cívký umístěny na nástavcích jha (c). Při měření se snažíme upravit vzorek tak, aby bylo rozložení intenzity magnetického pole pokud možno homogenní. Při magnetování vzduchovou cívkou se homogenity pole dosahuje úpravou vzorku do tvaru rotačního elipsoidu. U magnetování pomocí jha toho lze dosáhnout kombinací obou způsobů magnetování zobrazených na obr. 10 b, c.



Obr. 10: Rozložení intenzit polí tyčových vzorků

Měření magneticky tvrdých materiálů

Při měření magneticky tvrdých materiálů musí být dosaženo nasycení materiálu. Dostatečného nasycení se většinou dosahuje použitím jha. Magnetizačním jhem se musí dosáhnout požadované intenzity mezi pólovými nástavci, musí zachycovat mechanické síly, které vzájemně pólové nástavce přitahují a musí být u nich možnost plynule nastavovat vzdálenost. Čelní plochy musí být navíc dokonale rovnoběžné a hladké. Aby bylo možno dosažení maximální hodnoty indukce a intenzity, používají se pólové nástavce ve tvaru komolého kužele. Jejich minimální průměry jsou určeny normou.

Vzorky magneticky tvrdých materiálů mají obvykle tvar hranolku nebo válce. U vzorků se dodržuje malý poměr mezi délkou a tloušťkou. Tento poměr sice vyvolává velký

demagnetizační činitel, ten je ovšem vykompenzován malou permeabilitou magneticky tvrdých materiálů. Homogenního pole lze dosáhnout, jsou-li plochy pólových nástavců jha mnohem větší než průřez vzorku.

Při laboratorních měřeních je indukce měřena výhradně integračně pomocí měřicí cívky, která je navinuta těsně na vzorek, popř. navinuté na tuhé kostřičce, která je nasunuta na vzorek. Vzhledem k tomu, že cívka nedokonale obepíná vzorek a tok vzniklou vzduchovou mezerou není zanedbatelný, počítá se i s průměrem vodiče. Chybovou složku indukce lze korigovat buď softwarově, nebo obvodově použitím sumátoru. Při měření magnetické polarizace je kompenzován tok vzduchem, kdy nejjednodušším způsobem korekce je měření dvěma shodnými měřicími cívkami zapojenými antisériově.

Stejnosemenná měření magneticky měkkých materiálů

Přístroje, kterými se stejnosemenné magnetizační charakteristiky měří, se nazývají permeametry. V současnosti se využívají zejména permeametry kompenzační.

Měření masivních vzorku magneticky měkkých materiálů se v praxi příliš neprovádí. Důvodem je řídké využití masivních magneticky měkkých materiálů.

Při upnutí měřeného vzorku do jha je podobně jako u magneticky tvrdých materiálů pole vzorku nehomogenní. Je to způsobeno vysokou permeabilitou materiálu. Dostatečně homogenního magnetování lze u magneticky měkkých vzorků dosáhnout jen kompenzací úbytků magnetických napětí na vzduchových mezerách. Stav vykompenzování musí být v každém pracovním bodě indikován, což je důvod, proč většina permeametry neumožňuje spojitě měření.

Střídavá měření magneticky měkkých materiálů

Vzorky pro tento typ měření jsou tvořeny z pásků plechu nebo jejich svazky. Komplikace při střídavém magnetování magneticky měkkých materiálů jsou zejména nehomogenita pole a obtížné dosažení definovaného způsobu magnetování (zejména sinusového B).

Uzavřený magnetovací obvod tvoří spolu se vzorkem magnetovací jho, které je tvořeno stejně jako vzorek ze skládaných plechů. Přesný výpočet intenzity magnetického pole umožňuje pouze kompenzovaný ferometr, nebo je-li uzavřený magnetovací obvod poskládaný přímo z měřených plechů. Stejně jako u uzavřených vzorků se střídavá indukce určuje z indukovaného napětí ve vinutí, které obepíná materiál.

Epsteinův přístroj

Je to stará metoda původně určená na měření ztrát elektrotechnických plechů, vzhledem k obtížím při střídavém magnetování je ovšem stále velmi používaná. Další výhodou tohoto měření je jeho dobrá reprodukovatelnost. Nevýhodou je nemožnost využití této metody pro průběžná měření.

Vzorek je tvořen pásky plechů, které mají přesně stanovený rozměr. Tyto pásky se skládají do čtverce, přičemž v podstatě vznikne uzavřený vzorek. Vzhledem k tomu, že dutina cívek není dokonale vyplněna, je nutné kompenzovat tok uzavírající se vzduchem mimo vzorek.

Tato kapitola byla převzata z literárního zdroje [1].

Část vlastního měření

6. Výroba vzorků

Jak již napovídá samotný název diplomové práce, je cílem této práce změřit magnetické vlastnosti základních feromagnetických látek. Pro měření byly proto vyrobeny zdrojové vzorky čistých kovů plazmovou metalurgií. Konkrétně byly vzorky vyrobeny v plazmové peci pro tavení a rafinaci kovů s horizontálním měděným vodou chlazeným krystalizátorem (obr. 11).

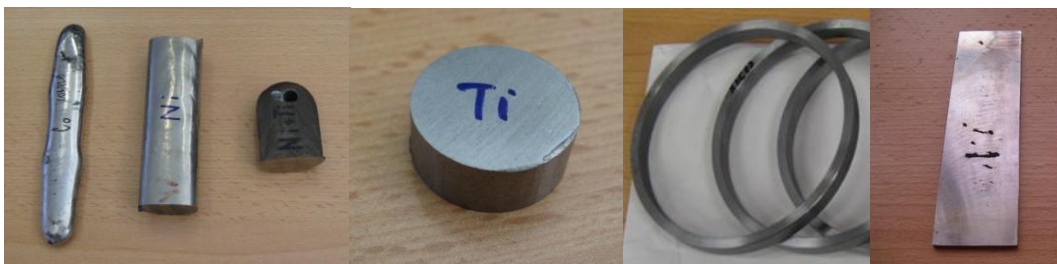
Technické parametry plazmové pece:

Maximální teplota:	6800 °C
Výkon:	70 kW
Atmosféra:	inertní – argon
Chlazení:	voda

Tato pec je součástí technického vybavení Katedry neželezných kovů, rafinace a recyklace na Fakultě metalurgie a materiálového inženýrství VŠB – TU Ostrava. Pro potřeby měření byly vyrobeny zdrojové vzorky kobaltu a niklu a slitiny niklu s titanem. Dále bylo měření provedeno na vzorcích železa a titanu, které byly získány z jiných zdrojů. Zdrojové vzorky jsou na obr. 12.



Obr. 11: Plazmová pec



Obr. 12: Zdrojové vzorky (zleva): Kobalt, Nikl, Nikl-titan, Titan, Železo, Nikl (elektrolyt)

Parametry a fotografie plazmové pece byly převzaty ze zdroje [8].

7. Měřicí systémy

Vlastní měření jednotlivých vzorků bylo provedeno v Laboratoři magnetických měření, spadající pod Fakultu elektrotechniky a informatiky na VŠB – TU Ostrava. Pro měření byly použity měřicí systémy REMACOMP C-200 a REMAGRAPH C-500, přičemž informace uvedené v této kapitole byly převzaty z internetového zdroje [7].

7.1 REMACOMP C-200

Tento měřicí systém slouží k zjišťování magnetických vlastností vzorků v dynamických magnetických polích. Konkrétně měří hysterezní BH charakteristiky nebo magnetovací charakteristiky daných vzorků pro nastavené požadované parametry.

Princip měření magnetických vlastností materiálů systémem REMACOMP C-200 je založen na obecné metodě měření na toroidu. Možnosti provedení vzorků pro měření je popsáno v další části této kapitoly.

Technické parametry

Základní parametry:

Možnosti měření:

- BH charakteristiky
- Magnetovací charakteristiky
- Demagnetizace

Nastavitelný frekvenční rozsah:

1 Hz – 10 kHz

Výkonový zesilovač (výstupní parametry):

400 VA; ± 36 V; ± 12 A

Další nastavitelné parametry pro vlastní měření:

Nastavitelný tvar budícího pole :

- sinus
- obdélník
- trojúhelník
- trapéz
- exponenciální puls
- pozitivní: sinus, obdélník, trojúhelník

Možnost nastavení regulace:

- proudová (proudové magnetování)
- napěťová (napěťové magnetování)

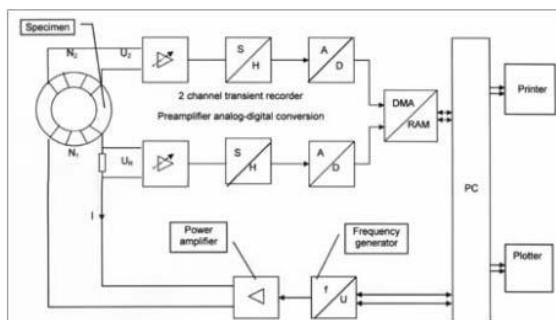
Rozšířené nastavení regulace:

- sinus intenzity pole H
- sinus indukce pole B

Možnost nastavení mezí:

- intenzity pole H_{max}
- indukce pole B_{max}

Provedení měřicího systému



Obr. 13: Provedení systému REMACOMP C-200 a blokové schéma zapojení

Základní části systému REMACOMP C-200:

- Výkonový lineární bipolární čtyř - kvadrantový zesilovač
- Rychlá DAQ (A/D – D/A) multifunkční karta PC-PCI
- Snímací a měřicí převodníky jednotlivých signálů
- Software COMP pro řízení, vyhodnocení a zpracování měřených dat (společně s PC)

Princip činnosti měřicího systému:

Magnetizační proud I_1 budícího vinutí N_1 je dodáván výkonovým čtyř-kvadrantovým zesilovačem a je zpětnovazebně řízen podle požadavků zadaných uživatelem přes PC a multifunkční DAQ kartu. Průběh indukovaného napětí na sekundárním vinutí N_2 , odpovídající

časové změně magnetické indukce ve vzorku je snímán zároveň s průběhem budícího proudu a prochází přes A/D převodníky, přičemž je poté softwarově vyhodnocován. Podle nastaveného způsobu regulace budícího proudu je pak na daném vzorku zjištěna BH charakteristika nebo amplitudová magnetizační charakteristika pro určité uživatelem požadované vstupní parametry budícího magnetického pole (frekvence, amplituda indukce nebo intenzity pole, tvar pole, atd.). Maximální intenzita pole pro měření je omezena výstupním výkonem zesilovače 400VA (± 36 V, ± 12 A). Těmito výstupními parametry zesilovače je omezen i frekvenční pracovní rozsah při měření vzorků.

Hlavní výhodou tohoto provedení měřícího systému je oproti systémům původně užívaným, kdy byla zdrojem budícího proudu průmyslová síť, zejména široká možnost řízení velikosti a tvaru budícího proudu pomocí výkonového zesilovače a digitálního generátoru signálu. Digitální zpracování měřených hodnot rovněž umožňuje provádět mnohem podrobnější a přesnější analýzy magnetických vlastností měřeného vzorku a materiálů.

Možnosti provedení vzorků

Pro měření na tomto systému lze použít poměrně širokou škálu provedení vzorku, které ovšem musí splňovat dva základní požadavky:

1. Vzorek musí mít konstantní a definovatelný průřez
2. Vzorek má mít definovatelnou střední siločáru

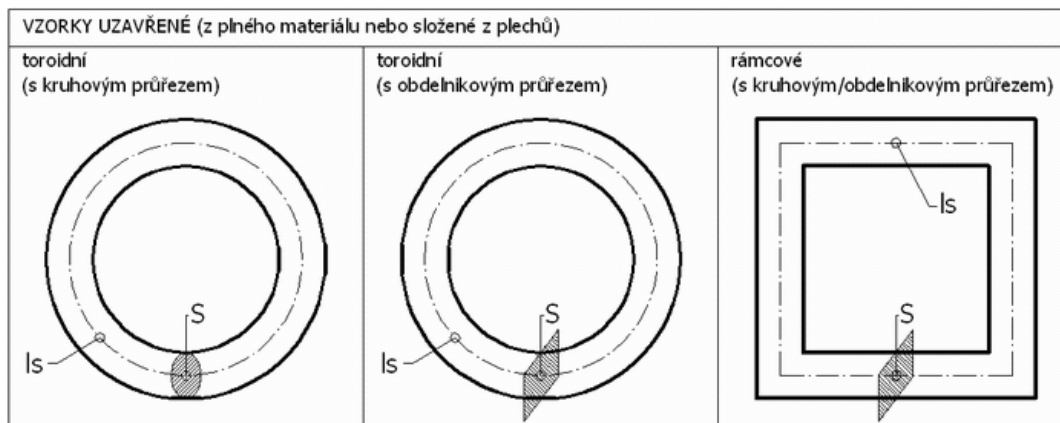
Krom těchto dvou základních bodů by měl vzorek splňovat i některé další požadavky:

- vyroben z kusu bez vnitřních defektů a bez deformací způsobených výrobou, pokud tyto nejsou žádoucí k posouzení
- vzorek by měl být lehce zbaven ostrých hran a otřepů po obvodu
- u uzavřených jader, skládaných z částí obvodů co nejlepší opracování stykových ploch a dobrá fixace
- pokud je možná anizotropie materiálů měla by být jejich orientace na magnetickém obvodu naznačena, a pokud je magnetický obvod skládaný musí být dobře zafixován.

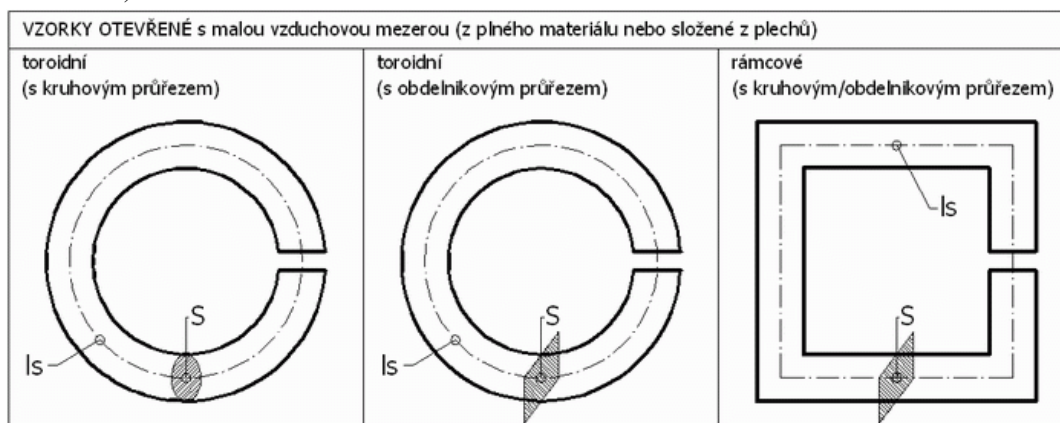
Dodržení těchto požadavků je nutné pro získání nezkreslených dat pro daný vzorek.

Typy vzorků:

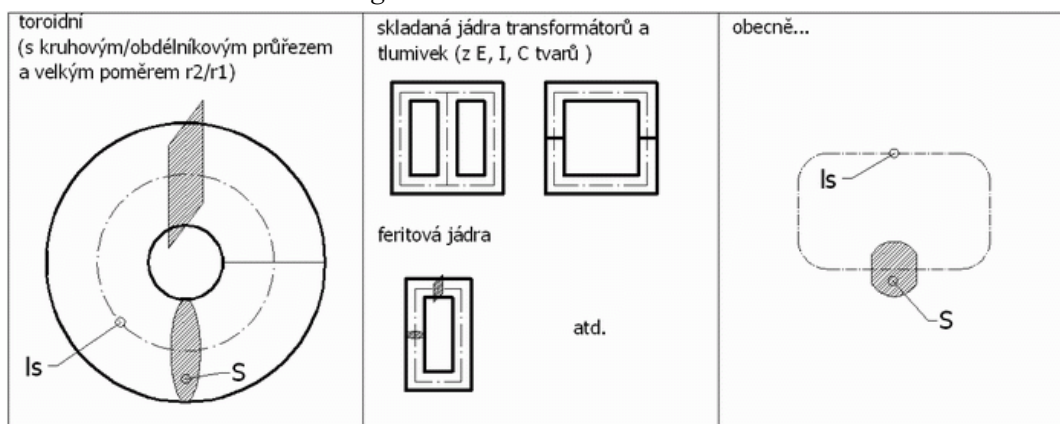
A. Pro měření magnetických vlastností - s malým poměrem r_2/r_1 (nejvyšší přesnost měření)



B. Pro měření magnetických vlastností - s malou vzduchovou mezerou (nižší přesnost měření)



C. Pro měření orientační a diagnostická



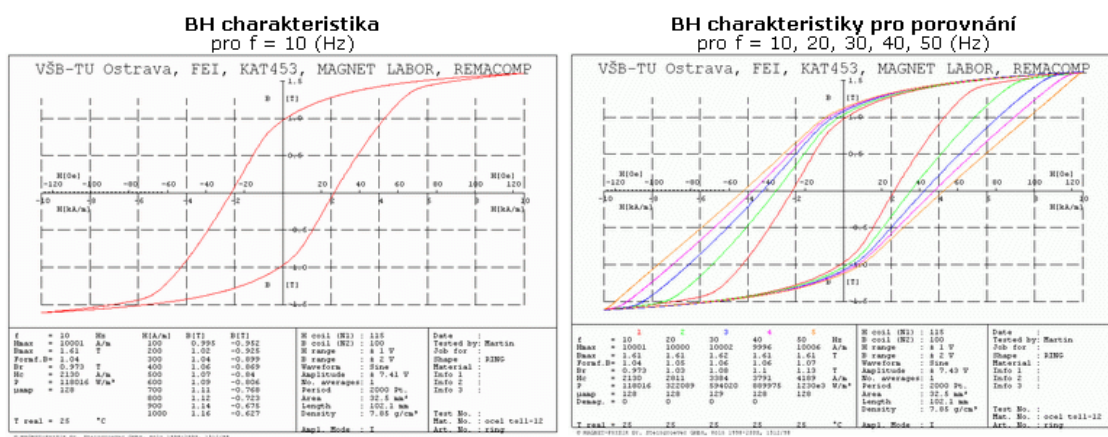
Možnosti výstupu zařízení:

Grafické protokoly:

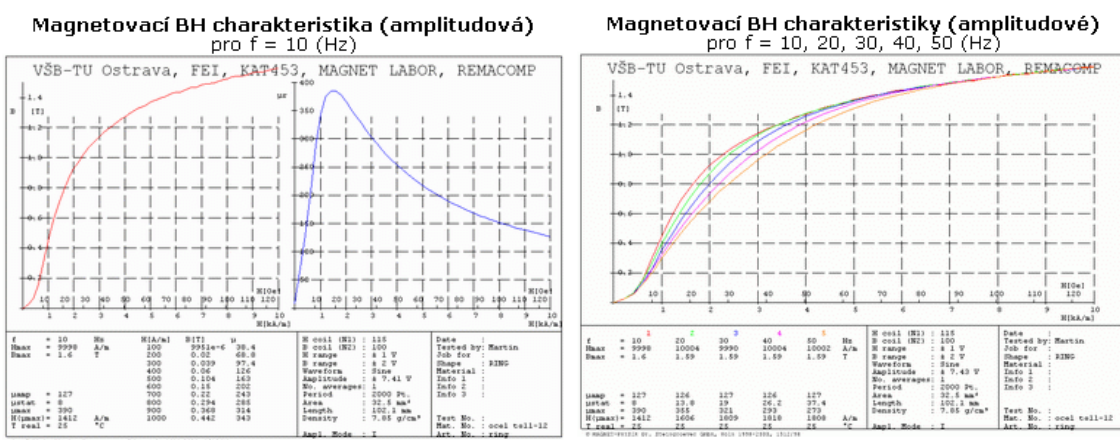
- BH charakteristiky
- Magnetovací charakteristiky
- Charakteristiky relativní permeability $\mu_r = f(H)$
- Záznam signálů budicího proudu a indukovaného napětí

Parametrické hodnoty:

- H_c [A/m] koercitivní síla
- B_r [T] remanentní indukce
- H_{max} [A/m], B_{max} [T] max. hodnoty intenzity a indukce při měření
- p [W/m³], [W/kg] magnetizační ztráty
- f [-] číselník tvaru křivky
- μ_{amp} , μ_{max} amplitudová a maximální relativní permeabilita
- některé další parametry



Obr. 14: Prezentace základních možností zobrazení BH charakteristik



Obr. 15: Prezentace základních možností zobrazení magnetovacích charakteristik

7.2 REMAGRAPH C-500

Oproti systému REMACOMP, který měřil magnetické vlastnosti v dynamických magnetických polích, slouží tento měřicí systém k zjišťování stacionární BH charakteristiky nebo magnetovací charakteristiky daných vzorků pro požadované parametry. Pojem stacionární magnetické pole je zde myšleno jako budící pole, které má tak malou časovou změnu, že se neprojeví vliv vířivých proudů ve vzorku. Další snižování časové změny tohoto budícího magnetického pole již nemá vliv na určené BH charakteristiky.

Princip měření magnetických vlastností materiálů je stejně jako u systému REMACOMP C-200 založen na obecné metodě měření na toroidu. V případě užití speciálního měřicího nástavce, lze magnetické vlastnosti měřit i na vzorcích otevřených – tyčových, které mají různé tvary průřezu. Provedení měřicího systému REMAGRAPH C-500 ukazuje obr. 16.

Technické parametry

Základní parametry:

Měřicí systém umožňuje měřit: - BH charakteristiky (celé křivky)

- BH charakteristiky - magnetovací (pouze první kvadrant)
- Demagnetizace (nastavitelná, exponenciální sinusová,
 $f_{\max} 1 \text{ Hz}$)

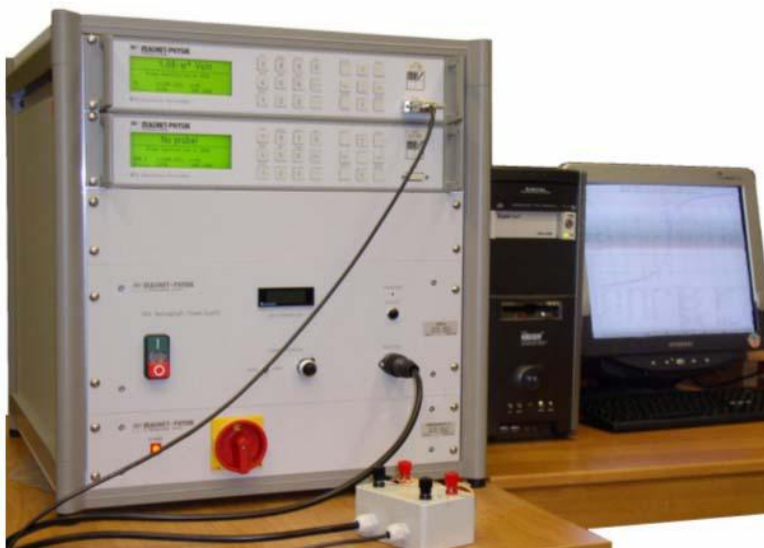
Nastavitelná rychlost měření: – magnetování dB/dt (rychlostí změny budícího proudu I_1)

Nastavitelná velikost počátečního magnetického pole: - předmagnetizace

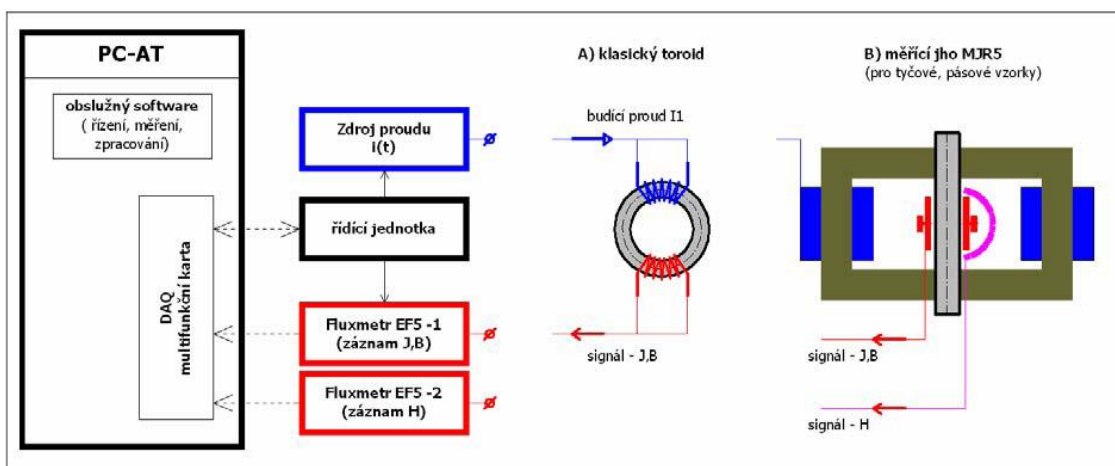
Možnost nastavení mezních hodnot pro měření: - intenzity pole H_{\max}
- indukce pole B_{\max} , J_{\max}

Výkonový zesilovač (výstupní parametry): 320 VA; $\pm 40 \text{ V}$; $\pm 8 \text{ A}$

Provedení měřicího systému



Obr. 16: Provedení měřicího systému REMAGRAPH C-500



Obr. 17: Blokové schéma zapojení měřicího systému REMAGRAPH C-500

Základní části systému REMAGRAPH C-500:

- Výkonový napájecí zdroj stejnosměrného proudu
- Elektronický fluxmetr -1 (záznam signálu H)
- Elektronický fluxmetr -2 (záznam signálu J, B)
- Řídící jednotka (synchronizace nastavení proudu a snímání veličin)
- multifunkční komunikační karta PC-PCI
- Software REMA pro řízení, vyhodnocení a zpracování měření a měřených dat (společně s PC)

Princip činnosti měřicího systému:

Princip činnosti a měřicí metody tohoto měřicího systému se oproti systému REMACOMP výrazně liší i přesto, že oba systémy vycházejí z metody měření na toroidu. Zpracovávání a vyhodnocování signálu indukovaného napětí v sekundárním vinutí, pomocí kterého je určována magnetická indukce ve vzorku, již nelze provádět osciloskopickou metodou. Důvodem je časová změna intenzity magnetického pole buzeného (kvazi) stacionárním proudem, která je velmi malá, takže v měřeném vzorku vyvolává velmi malou změnu magnetické indukce úměrnou magnetickým vlastnostem materiálu vzorku. Sekundární vinutí obklopující vzorek a v něm vytvořený rovněž velmi pomalu se měnící magnetický tok pak indukuje jen velmi malé a pozvolné napětíové impulsy. Z výše uvedených důvodů je pro měření a vyhodnocování indukovaného napětí nutno použít integrační měřicí přístroj. V tomto případě je použit elektronický fluxmetr.

Možnosti provedení vzorků

Magnetické vlastnosti lze zjišťovat na obdobných tvarech vzorků jako u měřicího systému REMACOMP.

Pro všechny typy vzorků určených pro měření jsou společné dva základní požadavky:

- a) aby vzorek měl konstantní a definovatelný průřez
- b) aby měl vzorek definovatelnou střední siločáru

Jak již bylo naznačeno, lze připojovat a měřit dva typy vzorků:

- vzorky klasické-uzavřené
- vzorky otevřené-tyčové

Požadavky na provedení vzorků pro měření na tomto systému jsou v podstatě stejné jako pro měření dynamických BH charakteristik (viz. Kapitola „REMACOMP C-200“)

Možnosti výstupu zařízení:






Grafické protokoly: - BH charakteristiky
 - Magnetovací charakteristiky
 - Charakteristiky relativní permeability $\mu_r = f(H)$



Parametrické hodnoty: - H_{cJ} , H_{cB} [A/m] koercitivní síla
 - B_r [T] remanentní indukce
 - H_{max} [A/m] maximální hodnoty intenzity a indukce při měření
 - J_{max} [T] maximální hodnota polarizace při měření
 - p [W/m³], [W/kg] magnetizační ztráty
 - μ_{max} maximální relativní permeabilita při měření
 - $H(\mu_{max})$ intenzita odpovídající max. relativní permeabilitě

8. Příprava vzorků

Ze zdrojových materiálů byly vyrobeny vzorky, převážně ve tvaru toroidu. Výjimku tvoří elektrolytická nikl. Mezi dodanými vzorky byl i jeden neoznačený, proto byl pro další měření označen jako vzorek X. Základní parametry jednotlivých vzorků jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 2: *Parametry vzorků*

Vzorek - toroid	Rozměry [mm]			Váha [g]
	vnější Ø	vnitřní Ø	výška	
Vzorek X 	16,90	9,53	7,60	10,0
Kobalt 	18,15	9,53	7,98	13,5
Titan 	16,88	9,46	8,88	4,5
Nikl 	14,67	9,46	8,33	5,0
Nikl – Titan 	16,95	10,28	8,08	7,0

Vzorek - toroid	Rozměry [mm]			Váha [g]
	vnější Ø	vnitřní Ø	výška	
Železo 	119,84	109,86	9,89	140,0
Vzorek - deska	Rozměry [mm]			Váha [g]
	délka	šířka	výška	
Nikl (elektrolyt) 	99,50	30,20	3,10	-

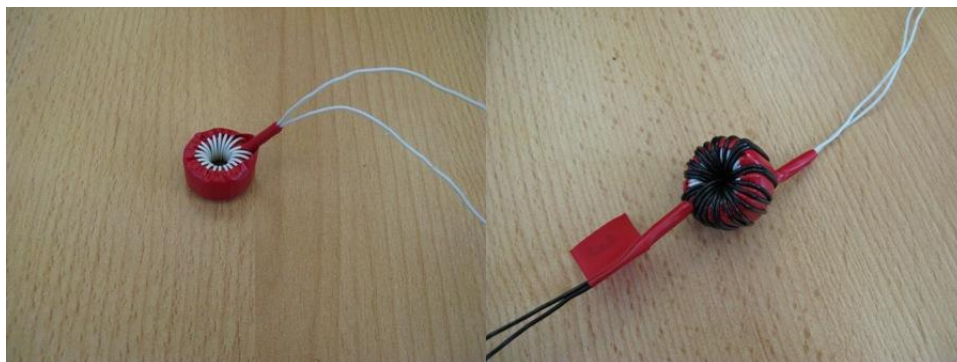
Nejdříve byly vzorky ovinuty izolační páskou, aby bylo zamezeno nežádoucímu přeskoku proudu, popřípadě poškození vodiče o hrany vzorku. Na toroidní vzorky bylo následně navinuto snímací (sekundární) vinutí. Pomocí tohoto vinutí přístroj stanoví magnetickou indukci, a to z naindukovaného napětí ve vzorku. Při navíjení vinutí byla snaha dosáhnout, co nejrovnoměrnějšího rozložení vinutí podél vzorku, jelikož i to ovlivňuje přesnost naměřených dat. Na obr. 19 je zobrazen toroidní vzorek ovinutý páskou a vedle něj vzorek s navinutým snímacím vinutím.



Obr. 19: (zleva) Ovinutý vzorek, vzorek se snímacím vinutím

Snímací vinutí bylo opět přelepeno izolační páskou pro oddělení od primárního vinutí, nazývaného také magnetovací vinutí. Magnetovacím vinutím prochází proud nastavený v měřicím přístroji. Proud procházející vodičem způsobuje magnetování vzorku. Na obr. 20 je vyfocen vzorek s izolační vrstvou oddělující snímací a magnetovací vinutí, vedle něj je zobrazen vzorek s navinutým magnetovacím vinutím. Dále jsou v tab. 3 uvedeny počty závitů

obou vinutí pro jednotlivé vzorky toroidního tvaru. Takto upravený vzorek je již připraven k samotnému připojení k měřicímu systému.

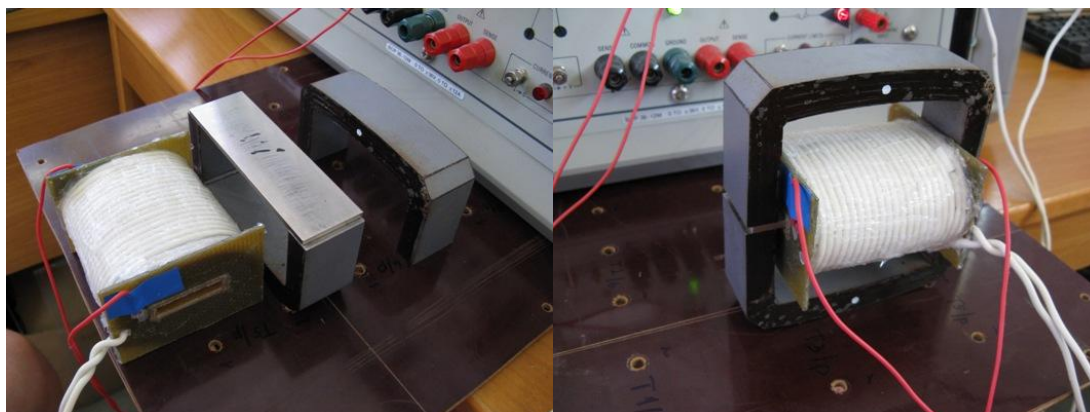


Obr. 20: (zleva) oddělovací izolace, magnetovací vinutí – hotový vzorek

Tab. 3: Počty závitů vinutí jednotlivých toroidních vzorků

Vzorek	Magnetovací vinutí [závity]	Snímací vinutí [závity]
Vzorek X	31	22
Kobalt	30	22
Titan	30	21
Nikl	25	20
Nikl – Titan	32	23
Železo	575	90

Vzorek elektrolytického niklu, který měl deskový tvar, byl oproti tomu měřen pomocí jha. U tohoto typu měření je největším problémem dosažení homogenity pole. Podrobněji je tento typ měření popsán v kapitole 5.2. Sestava pro toto měření je zobrazeno na obr. 21. U tohoto vzorku bylo provedeno pouze měření dynamických charakteristik.



Obr. 21: Sestava pro měření dynamických charakteristik pomocí jha

9. Postup měření

Jak již bylo popsáno v kapitole 7. této práce, používá se pro měření vzorků ve statických magnetických polích jiný měřicí systém, než při měření v dynamických polích. Obecný postup měření je ovšem velmi obdobný a proto je možno považovat uvedený postup za univerzální pro obě metody.

1. Pro samotné měření se vzorek připojí vývody příslušných vinutí na určené svorky.
2. Na počítači se ve speciálním softwaru zadají parametry daného vzorku (rozměry, počty vinutí), a také se zadají další doplňující informace (jméno řešitele, označení vzorku, aj.).
3. V softwaru se zadají parametry, pro které chceme danou charakteristiku změřit:
 - Statické charakteristiky – bylo nastavováno H_{\max} .
 - Dynamické charakteristiky – zadávalo se požadované H_{\max} a frekvence.

Možnosti nastavení jsou mnohem širší, parametry zde uvedené jsou pouze ty, které byly užity při měření této úlohy.

4. Po zapnutí již měření probíhá automaticky dle nastavených parametrů.
5. Výsledek měření se poté zobrazí a nastaví se měřítka os, zobrazované parametry, apod.
6. Finální graf se vyexportuje do programu, podporujícího úpravu obrázků, kde se uloží s požadovanou příponou (např. bmp, jpeg, gif).
7. Takto upravené grafy se poté zpracují, nejlépe do protokolu, ze kterého je možné přehledně vyčíst charakteristické vlastnosti daného vzorku.

10. Výsledky měření

V této kapitole jsou prezentovány výsledky měření. Formou ukázek grafických výstupů z měření ve statických i dynamických magnetických polích jsou zde ukázány charakteristické vlastnosti každého materiálu. Dále bude na základě výsledků určen vzorek X, a formou porovnání bude jeho původ prokázán. Porovnány budou i oba vzorky niklu a také ostatní materiály mezi sebou.

Při měření ve stacionárním magnetickém poli byly zachyceny charakteristiky pro různé hodnoty maximální intenzity. Konkrétně byly BH charakteristiky změřeny pro hodnoty $H_{\max} = 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000$ [A/m].

V dynamickém magnetickém poli byly BH charakteristiky měřeny nejen pro různé maximální intenzity, ale i pro různé frekvence. Navíc byly pro všechny tyto hodnoty zachyceny i magnetizační charakteristiky a křivky permeability.

Dynamické charakteristiky byly změřeny pro hodnoty:

- $H_{\max} = 1000, 2000, 3000, 4000, 5000$ [A/m]
- $f = 10, 25, 50, 100$ [Hz]

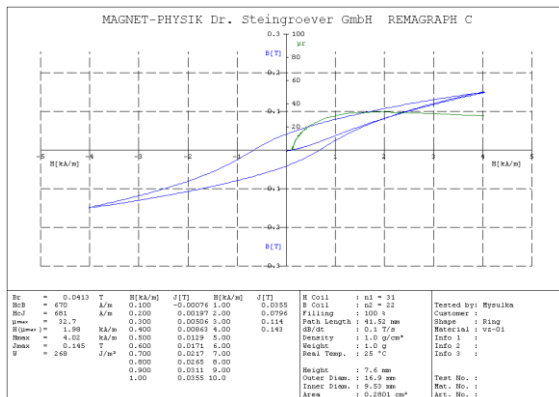
Jelikož by zveřejnění veškerých výstupních grafů v této práci zabralo velmi mnoho místa, jsou zde zobrazeny pouze souhrnné grafy a výsledky tak, aby bylo možné ukázat na nich zjištěné závěry. Kompletní zprávy jednotlivých vzorků jsou uloženy, jako přílohy této práci. Tabulkové hodnoty (viz. Tab. 4) pro porovnání byly převzaty ze strany 294 literárního zdroje [9].

Tab. 4: *Závislost magnetické indukce a poměrné permeability na intenzitě magnetického pole*

H [A/m]	Fe		Ni		Co	
	B [T]	μ_r [-]	B [T]	μ_r [-]	B [T]	μ_r [-]
80	0,580	5 800,0	0,065	650,0	-	-
120	0,750	5 000,0	0,135	900,0	-	-
200	0,920	3 680,0	0,280	1 120,0	0,021	84,0
400	1,100	2 200,0	0,433	865,0	0,057	114,0
800	1,230	1 230,0	0,494	494,0	0,170	170,0
1 600	1,345	673,0	0,540	270,0	0,340	170,0
4 000	1,485	297,0	0,585	117,0	0,596	119,0
8 000	1,600	160,0	0,620	62,0	0,784	78,0
12 000	1,686	112,0	0,640	43,0	0,900	60,0
24 000	1,840	61,3	0,670	22,0	-	-
40 000	1,920	38,4	0,691	14,0	-	-
80 000	2,000	20,0	0,737	7,4	-	-
160 000	2,106	10,5	0,840	4,2	-	-
240 000	2,210	7,4	0,938	3,1	-	-
320 000	2,313	5,8	1,040	2,6	-	-
400 000	2,412	4,8	-	-	-	-
480 000	2,513	4,2	-	-	-	-

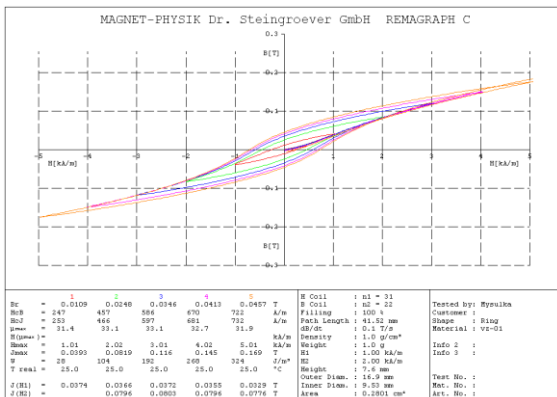
10.1 Vzorek X

Statické charakteristiky:



a) BH charakteristika:

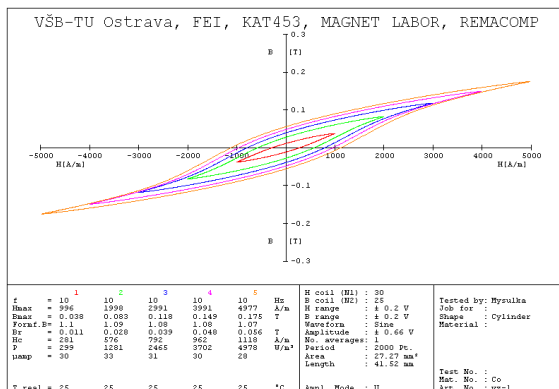
$H_{\max} = 4 \text{ kA/m}$



b) BH charakteristika:

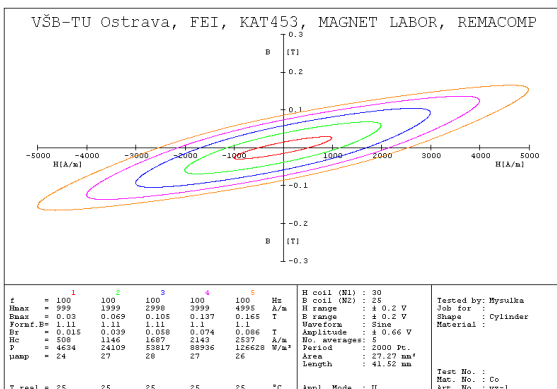
$H_{\max} = (1, 2, 3, 4, 5) \text{ kA/m}$

Dynamické charakteristiky:



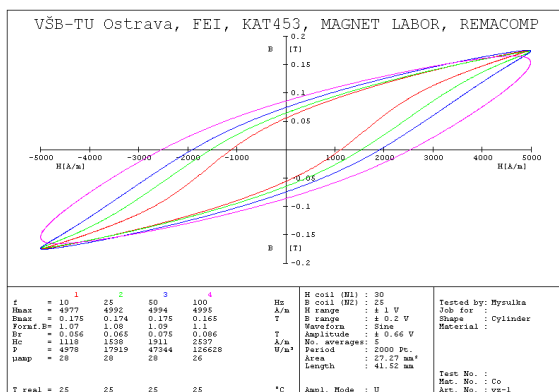
a) BH charakteristika:

$f = 10 \text{ Hz}$, $H_{\max} = (1, 2, 3, 4, 5) \text{ kA/m}$



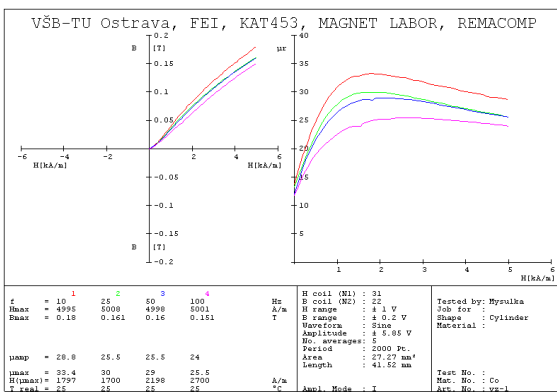
b) BH charakteristika:

$f = 100 \text{ Hz}$, $H_{\max} = (1, 2, 3, 4, 5) \text{ kA/m}$



c) BH charakteristika:

$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$, $f = (10, 25, 50, 100) \text{ Hz}$



d) Magnetovací a μ_r charakteristika:

$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$, $f = (10, 25, 50, 100) \text{ Hz}$

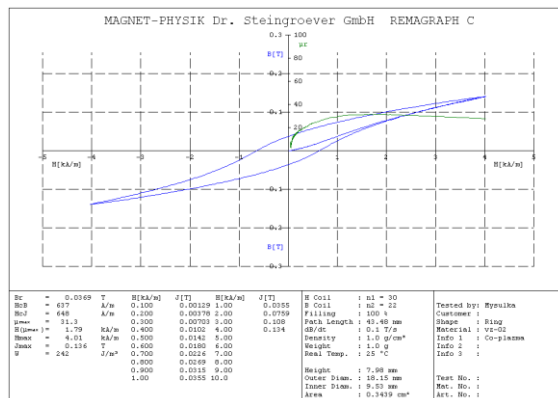
Tab. 5: Naměřené hodnoty vzorku X pro $H_{\max} = 4 \text{ kA/m}$

$B_r [\text{T}]$	$\mu_{\max} [-]$
0,0413	32,7

V tabulce jsou hodnoty, které jsou po prezentaci výsledků ostatních vzorků porovnány, a je také určen materiál, ze kterého je vzorek vyroben. Konečné určení vzorku je v kapitole 10.8.

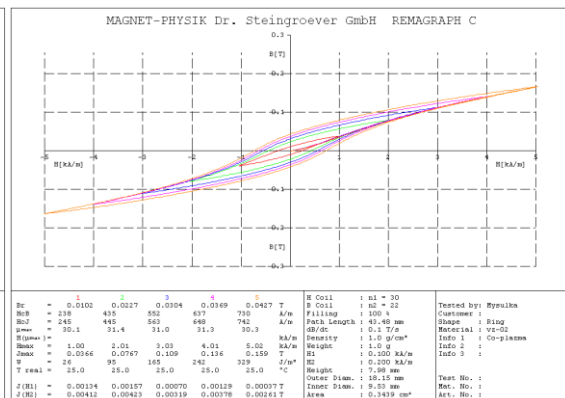
10.2 Kobalt (Co)

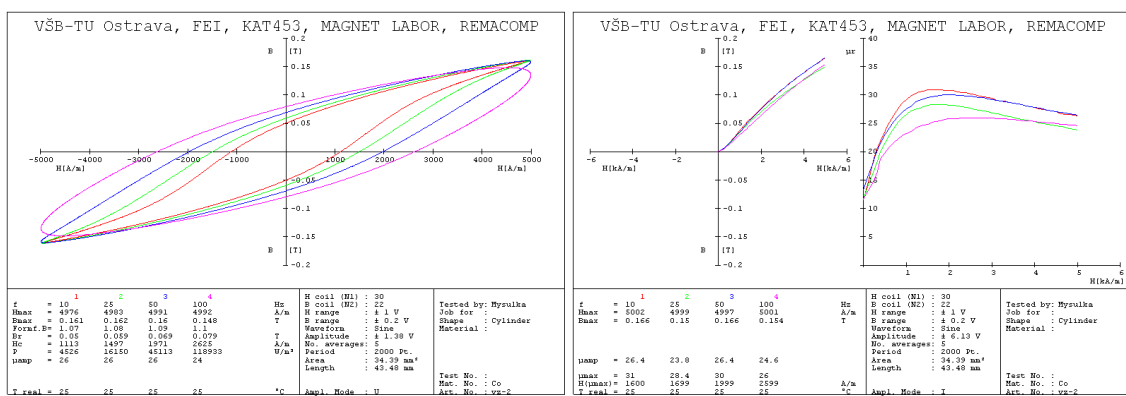
Statické charakteristiky:



a) BH charakteristika:

$H_{\max} = 4 \text{ kA/m}$





Tab. 6: Porovnání naměřených hodnot s tabulkovými pro Co

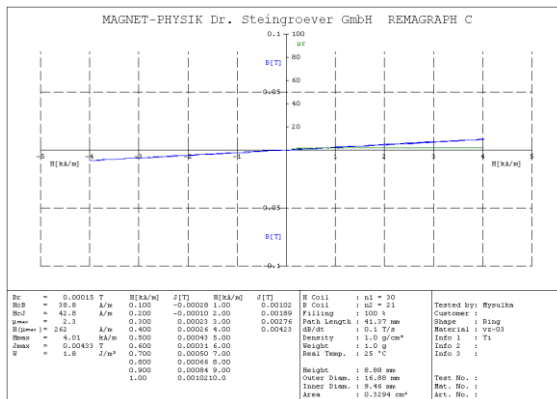
	H [A/m]	B [T]	μ_r [-]
Tabulky	4000	0,596	119,0
Naměřené	4000	0,147	27,0

Z tabulky je patrné, že hodnoty jsou oproti tabulkovým hodnotám nižší. Nejpravděpodobnější příčinou tak značného poklesu jsou fyzikální vlivy, jež značně mohou značně ovlivnit veličiny související s magnetickou hysterezí. Určité zkreslení mohly způsobit také ztráty, například v důsledku ne úplně rovnoměrného rozložení závitů.

Na průbězích dynamických charakteristik je vidět, jak se změní průběhy pro různé hodnoty maximální intenzity a konstantní frekvence (průběhy a, b). Se zvyšující se maximální intenzitou se zvyšují i hodnoty remanentní indukce a koercitivní intenzity, tvar křivky se ovšem příliš nemění. Při změnách frekvencí pro konstantní maximální intenzitu (průběh c) je patrná změna tvaru křivky (zaobluje se).

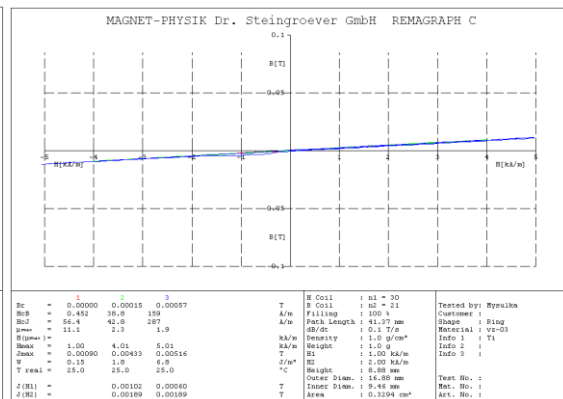
10.3 Titan (Ti)

Statické charakteristiky:



a) BH charakteristika:

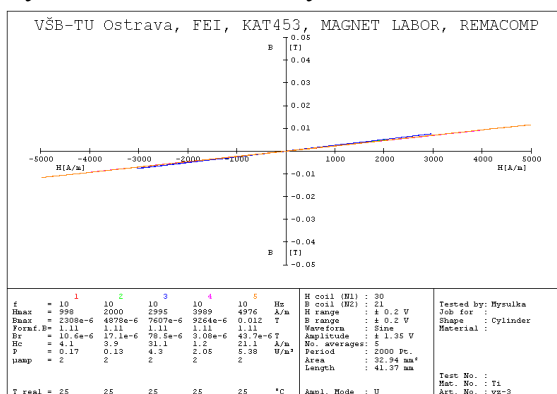
$H_{\max} = 4 \text{ kA/m}$



b) BH charakteristika:

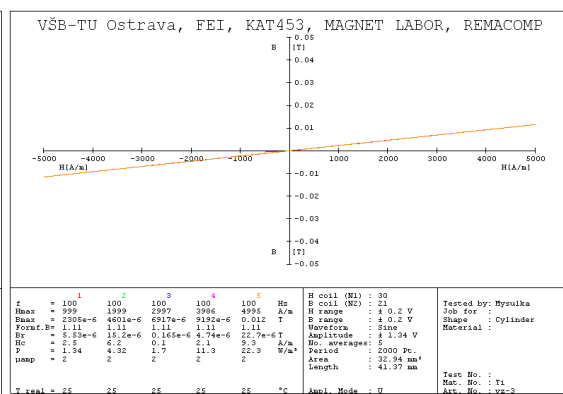
$H_{\max} = (1, 2, 3, 4, 5) \text{ kA/m}$

Dynamické charakteristiky:



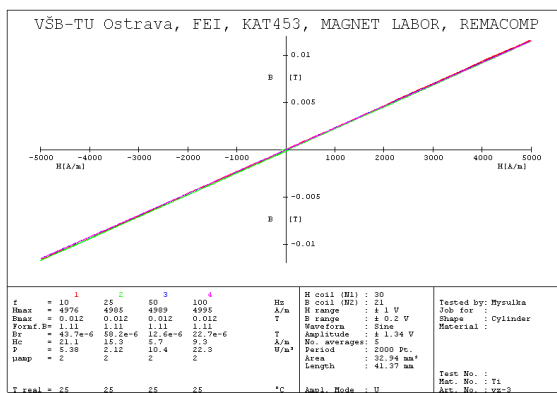
a) BH charakteristika:

$f = 10 \text{ Hz}$, $H_{\max} = (1, 2, 3, 4, 5) \text{ kA/m}$



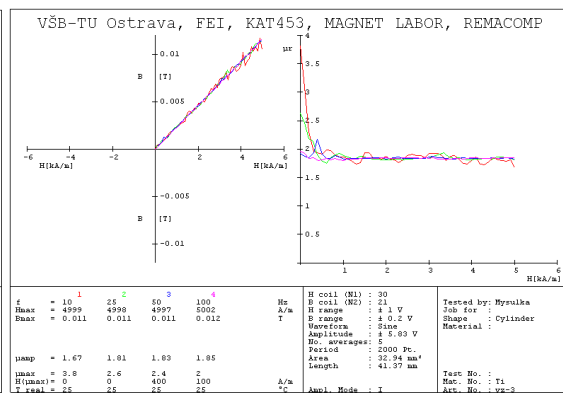
b) BH charakteristika:

$f = 100 \text{ Hz}$, $H_{\max} = (1, 2, 3, 4, 5) \text{ kA/m}$



c) BH charakteristika:

$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$, $f = (10, 25, 50, 100) \text{ Hz}$



d) Magnetovací a μ_r charakteristika:

$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$, $f = (10, 25, 50, 100) \text{ Hz}$

Tab. 7: Naměřené hodnoty T_i pro $H_{\max} = 4 \text{ kA/m}$

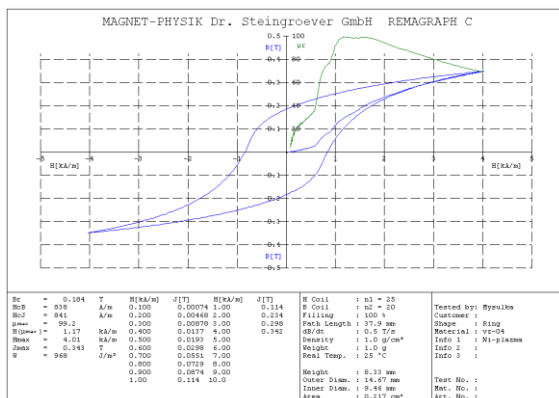
B_r [T]	μ_{\max} [-]
$1,5 \cdot 10^{-4}$	2,3

Naměřené výstupy u vzorku titanu odpovídají teorii. Titan není totiž feromagnetický materiál, řadí se mezi paramagnetika, což potvrzuje i permeabilita nepřesahující o mnoho permeabilitu vzduchu.

Žádné změny parametrů nevedly k viditelným změnám průběhů. Ty se pouze prodlužovaly v závislosti na zvyšování parametru H_{\max} .

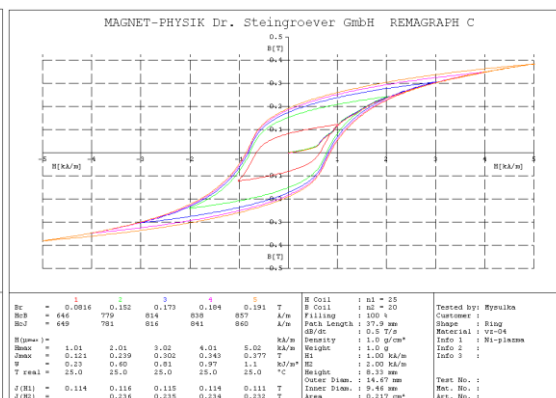
10.4 Nikl (Ni)

Statické charakteristiky:



a) BH charakteristika:

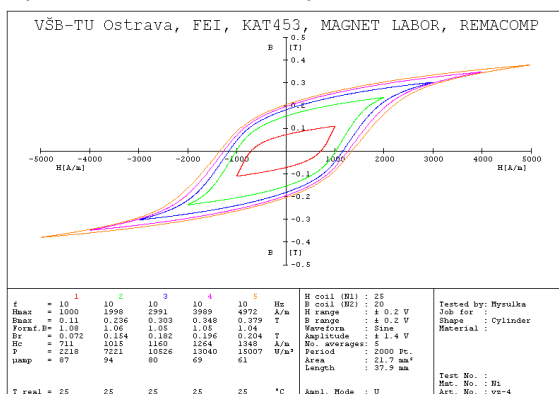
$H_{\max} = 4 \text{ kA/m}$



b) BH charakteristika:

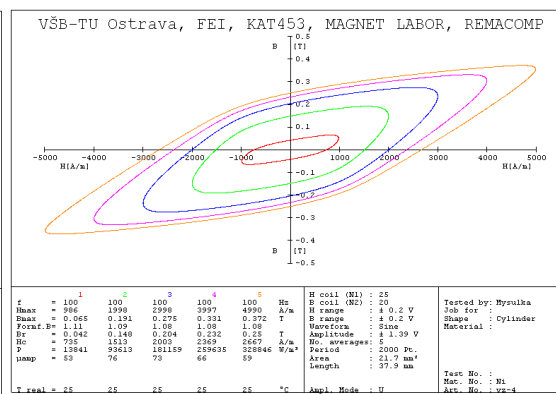
$H_{\max} = (1, 2, 3, 4, 5) \text{ kA/m}$

Dynamické charakteristiky:



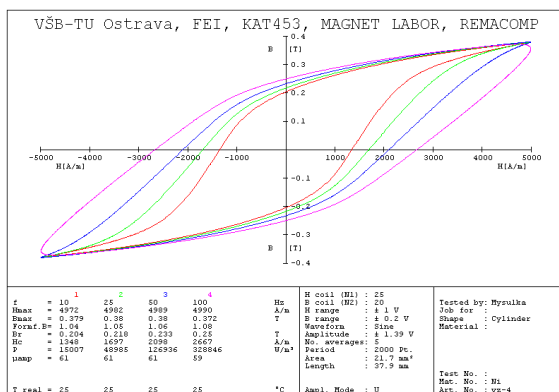
a) BH charakteristika:

$f = 10 \text{ Hz}$, $H_{\max} = (1, 2, 3, 4, 5) \text{ kA/m}$



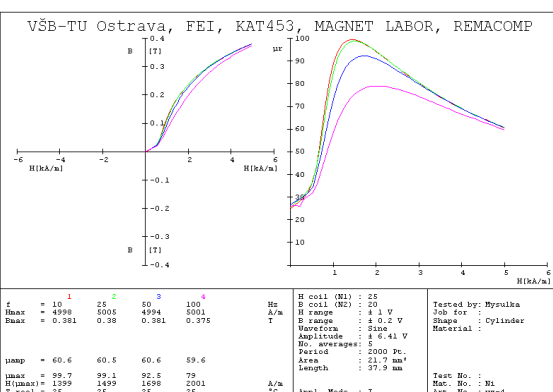
b) BH charakteristika:

$f = 100 \text{ Hz}$, $H_{\max} = (1, 2, 3, 4, 5) \text{ kA/m}$



c) BH charakteristika:

$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$, $f = (10, 25, 50, 100) \text{ Hz}$



d) Magnetovací a μ_r charakteristika:

$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$, $f = (10, 25, 50, 100) \text{ Hz}$

Tab. 8: Porovnání naměřených hodnot s tabulkovými pro Ni

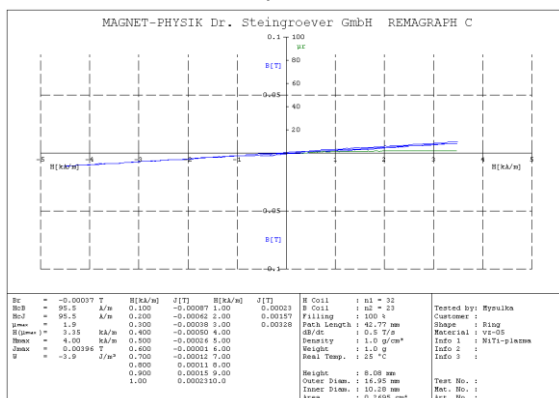
	H [A/m]	B [T]	μ_r [-]
Tabulky	4000	0,585	117,0
Naměřené	4000	0,351	68,6

Z tabulky lze vyčíst, že měřený vzorek má při dané intenzitě nižší indukčnost i permeabilitu, než udávají tabulkové hodnoty.

Na dynamických charakteristikách jsou patrné změny tvaru hysterezních smyček pro různé frekvence a H_{\max} . Na μ_r charakteristice je vidět, že se zvyšující se frekvencí se maximum průběhu snižovalo k menším hodnotám, ovšem se zvyšující se intenzitou pole se rozdíly mezi křivkami snižovaly.

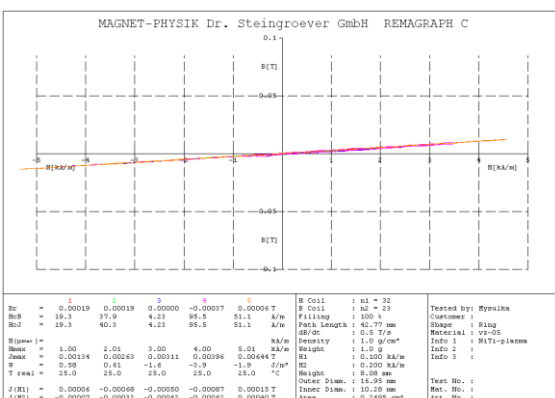
10.5 Nikl – titan (NiTi)

Statické charakteristiky:



a) BH charakteristika:

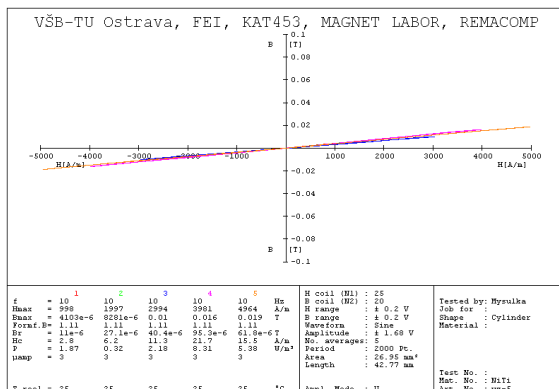
$H_{\max} = 4 \text{ kA/m}$



b) BH charakteristika:

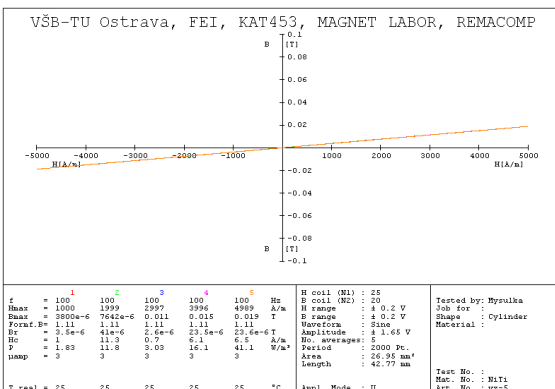
$H_{\max} = (1, 2, 3, 4, 5) \text{ kA/m}$

Dynamické charakteristiky:



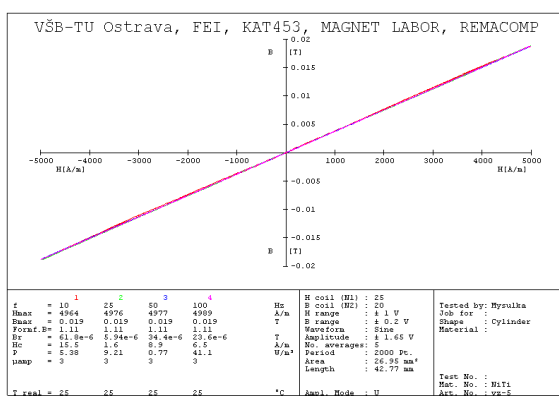
a) BH charakteristika:

$f = 10 \text{ Hz}$, $H_{\max} = (1, 2, 3, 4, 5) \text{ kA/m}$



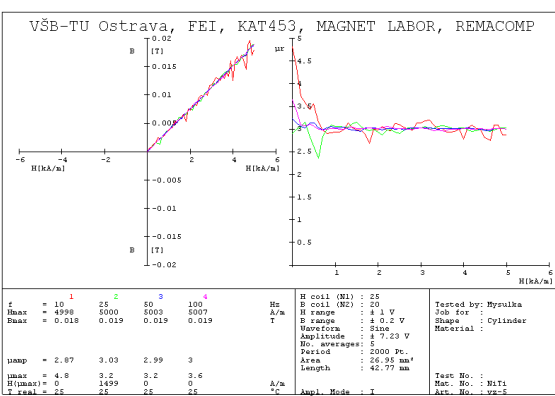
b) BH charakteristika:

$f = 100 \text{ Hz}$, $H_{\max} = (1, 2, 3, 4, 5) \text{ kA/m}$



c) BH charakteristika:

$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$, $f = (10, 25, 50, 100) \text{ Hz}$



d) Magnetovací a μ_r charakteristika:

$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$, $f = (10, 25, 50, 100) \text{ Hz}$

Tab. 9: Naměřené hodnoty NiTi pro $H_{\max} = 4 \text{ kA/m}$

B_r [T]	μ_{\max} [-]
$3,7 \cdot 10^{-4}$	1,9

Jak z hodnot uvedených v tabulce, tak i ze samotných průběhů je patrné, že tato slitina se z hlediska magnetických vlastností blíží vlastnostem titanu, resp. vzduchu. Vykazuje pouze velmi slabé magnetické vlastnosti, což koresponduje i s jejím primárním užitím, a to jako materiálu s tvarovou pamětí.

Tab. 10: Porovnání naměřených hodnot s tabulkovými pro Fe

	H [A/m]	B [T]	μ_r [-]
Tabulky	4000	1,485	297
Naměřené	4000	1,680	346

Ze statické charakteristiky je patrné, že hysterezní smyčka je velmi úzká, z čehož plyne, že se jedná o klasický magneticky měkký materiál (snadná magnetizace). Hodnoty indukce permeability se od tabulkové hodnoty mírně liší, ovšem permeabilita železa se mění v širokém rozsahu zejména podle způsobu mechanického a tepelného zpracování.

Z dynamických charakteristik lze vyčíst, že při zvyšování H_{\max} dochází i ke zvětšování hysterezní smyčky tzn., zvyšují se hodnoty remanentní indukce i koercitivní intenzity. Při změně frekvence pro konstantní H_{\max} se tvar křivky pro $f = 10$ Hz výrazněji liší od tvaru křivky pro ostatní použité frekvence. Obecně lze ovšem říci, že se zvyšující se frekvencí klesá hodnota remanentní indukce a roste hodnota koercitivní intenzity.

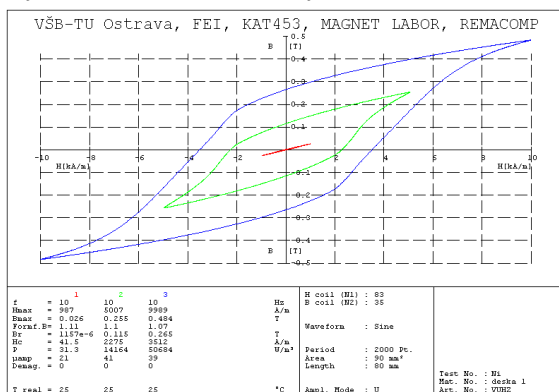
Z μ_r charakteristiky lze vyčíst, že s rostoucí frekvencí se posouvá maximum křivky permeability k nižším hodnotám, a to poměrně výrazně.

10.7 Nikl - elektrolytický (Ni)

Statické charakteristiky:

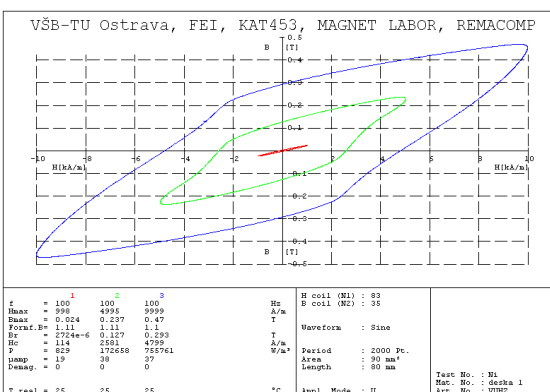
Nebyly zaznamenány

Dynamické charakteristiky:



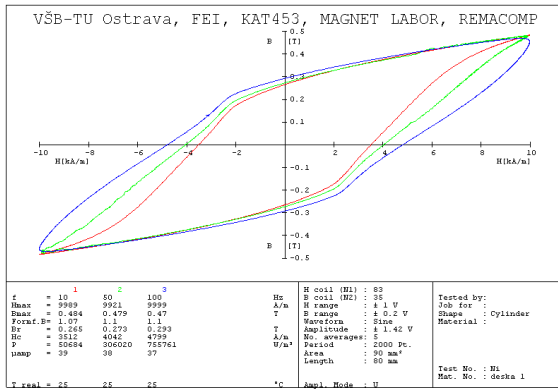
a) BH charakteristika:

$f = 10$ Hz, $H_{\max} = (1, 5, 10)$ kA/m



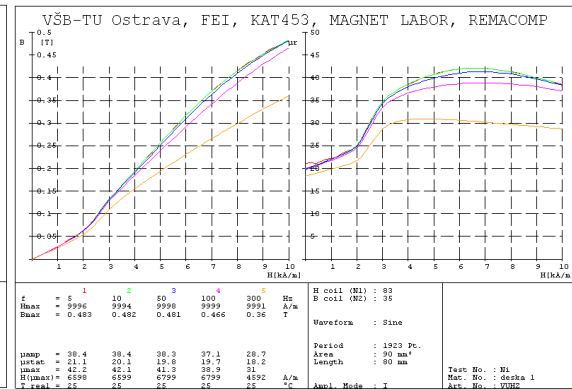
b) BH charakteristika:

$f = 100$ Hz, $H_{\max} = (1, 5, 10)$ kA/m



c) BH charakteristika:

$H_{\max} = 10 \text{ kA/m}$, $f = (10, 50, 100) \text{ Hz}$



d) Magnetovací a μ_r charakteristika:

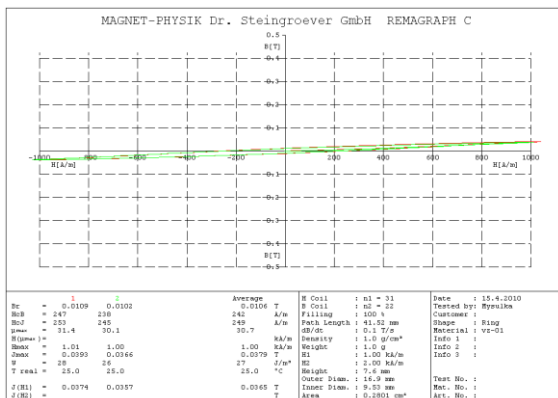
$H_{\max} = 10 \text{ kA/m}$, $f = (5, 10, 50, 100, 300) \text{ Hz}$

Na dynamických charakteristikách tohoto niklu je vidět zvětšující se hysterezní smyčky v závislosti na rostoucí maximální intenzitě. Oproti tomu změny při rostoucí frekvenci již nejsou tak výrazné a permeabilita (kromě hodnoty pro 300Hz) se také výrazněji nemění při změně frekvence.

10.8 Určení vzorku X

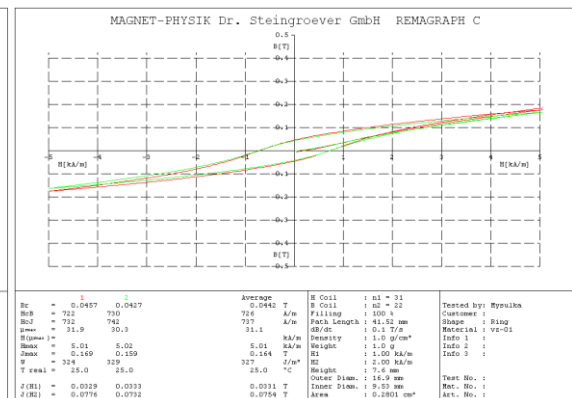
Již při prvním porovnání výsledku měření vzorku X s ostatními měřeními materiály je patrné, že jsou jeho průběhy BH charakteristik téměř shodné s výsledky naměřenými pro vzorek kobaltu. Proto jsou pro ověření tohoto předpokladu v následujících ukázkách porovnány právě tyto dva vzorky.

Statické charakteristiky:



a) BH charakteristika:

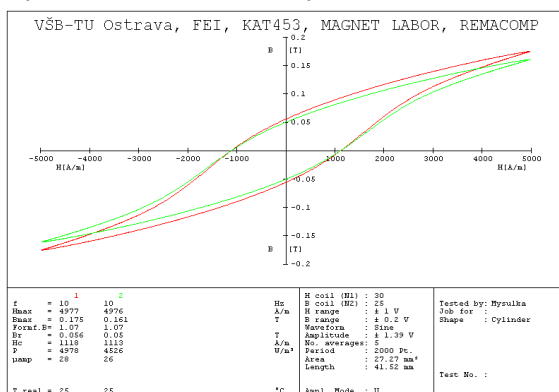
$H_{\max} = 1 \text{ kA/m}$



b) BH charakteristika:

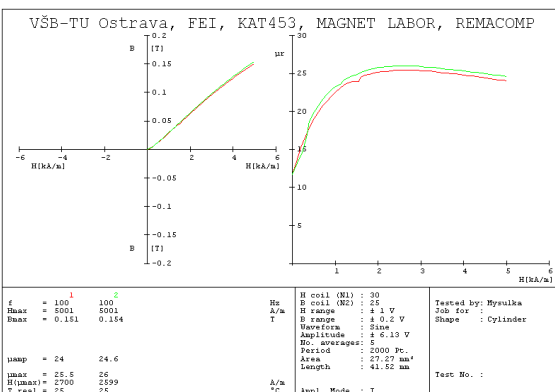
$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$

Dynamické charakteristiky:



a) BH charakteristika:

$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$, $f = 10 \text{ Hz}$



b) Magnetovací a μ_r charakteristika:

$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$, $f = 100 \text{ Hz}$

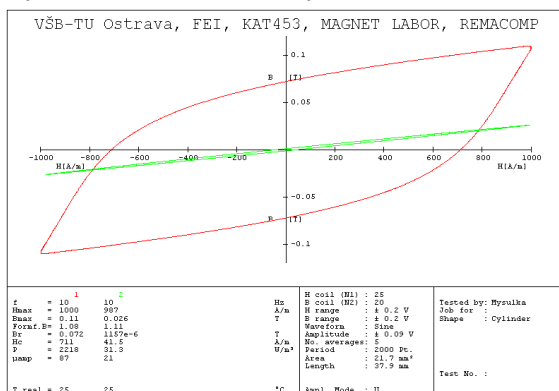
Jak je patrné z porovnání statických i dynamických charakteristik obou vzorků, jsou průběhy veličin téměř stejné, pouze s velmi mírnými odchylkami. Z toho lze s jistotou usuzovat, že dodaný neoznačený materiál byl vzorek kobaltu.

10.9 Porovnání vzorků niklu

Vzhledem k tomu, že pro měření byly k dispozici dva vzorky niklu, přičemž každý byl vyroben jinou metodou, nabízí se jejich porovnání z hlediska magnetických vlastností, které vykazují.

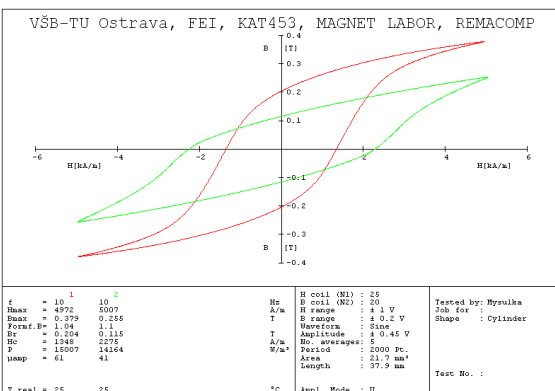
Červenou barvou jsou v grafech znázorněny charakteristiky niklu vyrobeného plazmovou metalurgií, zatímco zelenou barvou jsou vykresleny charakteristiky niklu elektrolytického.

Dynamické charakteristiky:



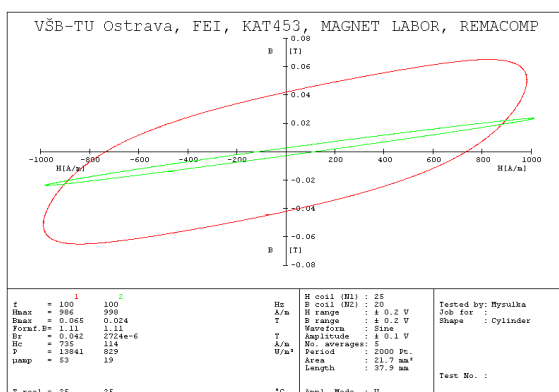
a) BH charakteristika:

$H_{\max} = 1 \text{ kA/m}$, $f = 10 \text{ Hz}$



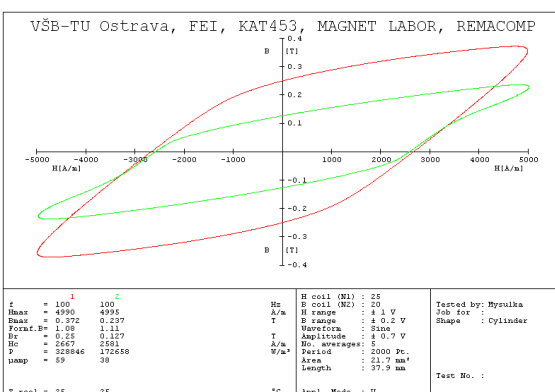
b) BH charakteristika:

$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$, $f = 10 \text{ Hz}$



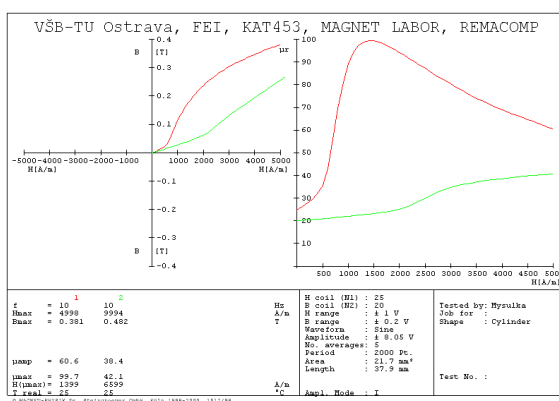
c) BH charakteristika:

$$H_{\max} = 1 \text{ kA/m, } f = 100 \text{ Hz}$$



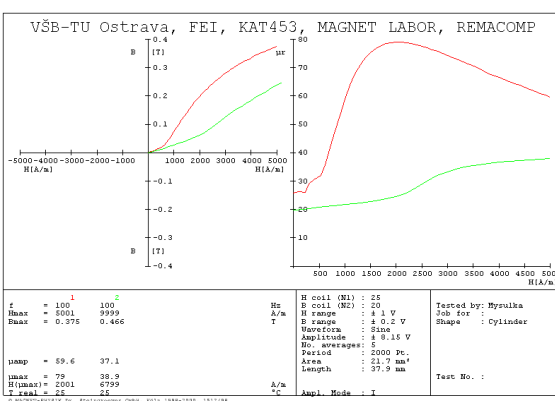
d) BH charakteristika:

$$H_{\max} = 5 \text{ kA/m, } f = 100 \text{ Hz}$$



e) Magnetovací a μ_r charakteristika:

$$H_{\max} = 5 \text{ kA/m, } f = 10 \text{ Hz}$$



f) Magnetovací a μ_r charakteristika:

$$H_{\max} = 5 \text{ kA/m, } f = 100 \text{ Hz}$$

Na dynamických charakteristikách jsou patrné značné rozdíly v magnetických vlastnostech obou vzorků, a to zejména při nižších hodnotách maximální intenzity pole. Z průběhů je zřejmé, že lepších magnetických vlastností dosahuje nikl vyrobený plazmovou metalurgií, který dosahuje vyšších hodnot remanentní indukce při stejných nebo nižších hodnotách koercitivní intenzity.

Také při srovnání permeabilit obou vzorků vykazuje vyšší hodnoty nikl vyrobený plazmovou metalurgií oproti niklu elektrolytickému. Nikl vyrobený plazmovou metalurgií tedy více zesiluje magnetické pole.

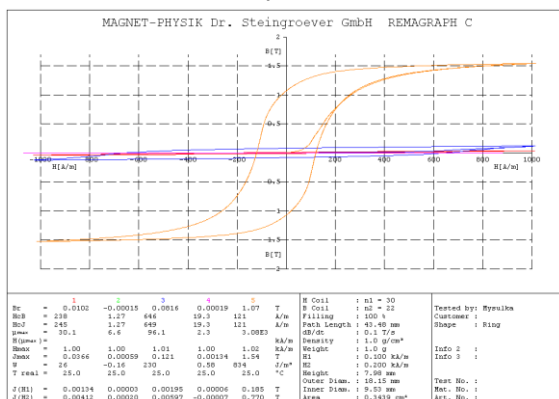
10.10 Porovnání vybraných vzorků

Vzhledem k tomu, že software vytvářející grafický přehled podporuje porovnání maximálně pěti vzorků, nemohly být do tohoto celkového srovnání zařazeny všechny. Jelikož velikost hysterezní smyčky železa výrazně převyšuje všechny ostatní, je vždy vedle celkového pohledu na přehled vždy vřazen detail na ostatní hysterezní smyčky (tedy mimo železo).

Následující přehled udává nejen vzorky, jež byly do porovnání zahrnuty, ale slouží také jako legenda pro orientaci v následujících zobrazení:

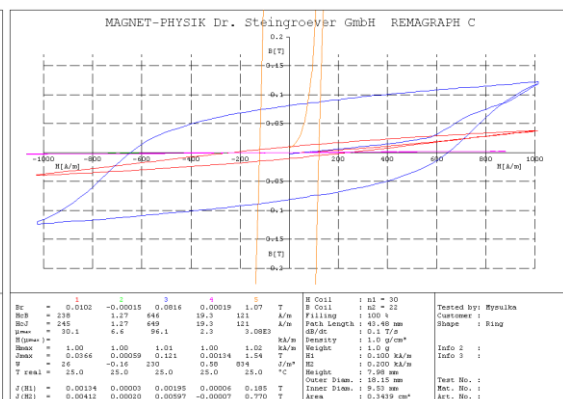
1. Kobalt
2. Titan
3. Nikl (vyrobený plazmovou metalurgií)
4. Nikl – titan
5. Železo

Statické charakteristiky:



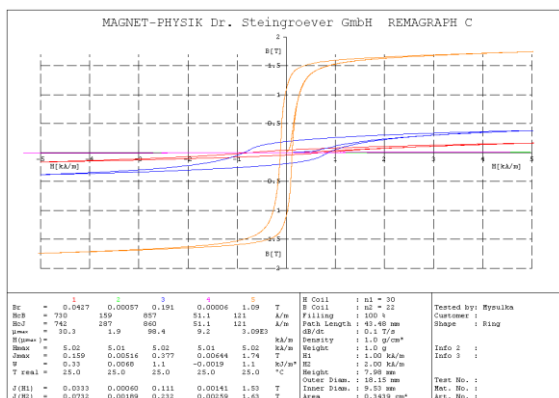
a) BH charakteristiky:

$H_{\max} = 1 \text{ kA/m}$



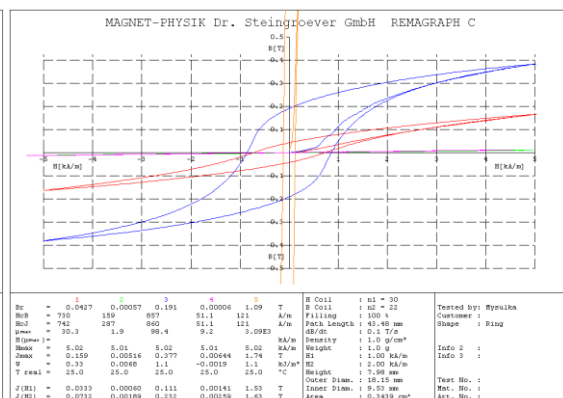
b) BH charakteristiky - detail:

$H_{\max} = 1 \text{ kA/m}$



c) BH charakteristiky:

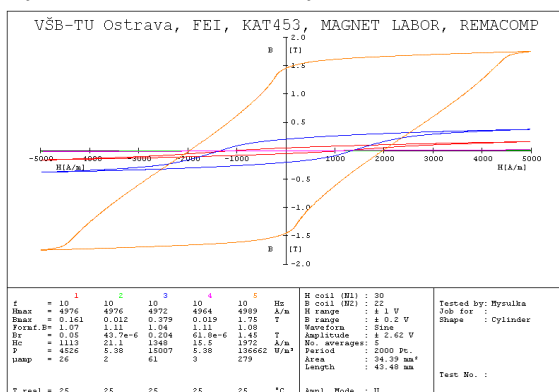
$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$



d) BH charakteristiky - detail:

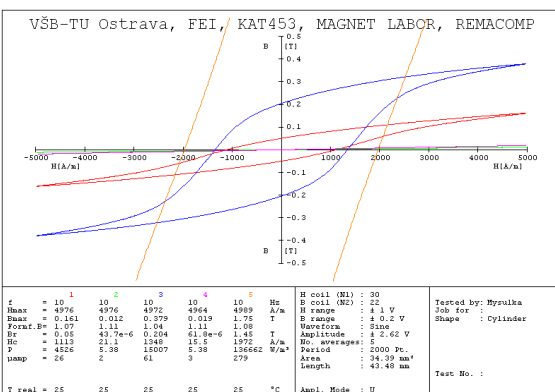
$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$

Dynamické charakteristiky:



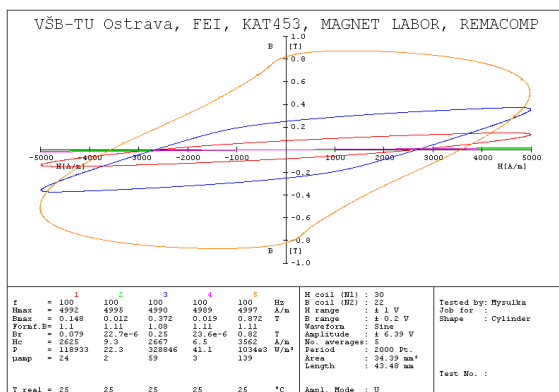
a) BH charakteristiky:

$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$, $f = 10 \text{ Hz}$



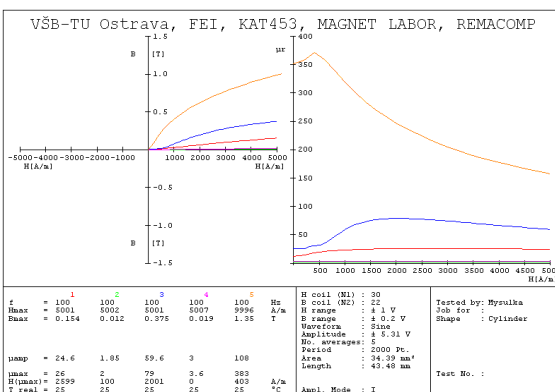
b) BH charakteristiky - detail:

$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$, $f = 10 \text{ Hz}$



c) BH charakteristiky:

$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$, $f = 100 \text{ Hz}$



d) Magnetovací a μ_r charakteristiky:

$H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$, $f = 100 \text{ Hz}$

Kromě titanu a slitiny niklu s titanem, které jeví jen slabé magnetické vlastnosti, jsou v porovnání patrné typické feromagnetické materiály, tedy železo, kobalt a nikl. Měření titanu a slitiny NiTi jsou spíše orientačního charakteru, jelikož nebyla provedena kompenzace mezi vinutím a vzorkem. Pokud by byla provedena tato kompenzace, blížily by se hodnoty permeability více k hodnotě $\mu_r = 1$.

Při porovnání permeabilit je patrné, že nejvíce magnetické pole zesiluje železo, následováno niklem a kobaltem. V tomto směru je tedy potvrzena teorie o rozdílu feromagnetik oproti ostatním materiálům, tedy že je jejich permeabilita výrazně vyšší, oproti ostatním materiálům, resp. vzduchu.

Tab. 11: Shrnutí některých parametrů porovnávaných feromagnetik pro $H_{\max} = 5 \text{ kA/m}$

	H_c [A/m]	B_r [T]	B_{\max} [T]	μ_r [-]
Železo	121	1,0900	1,740	320
Kobalt	730	0,0427	0,159	25
Nikl	159	0,1910	0,377	61

Koercitivní síly H_c uvedené v přehledu ukazují intenzitu pole potřebnou k dosažení nulové indukce materiálu. Je to jeden z hlavních kritérií, pro magneticky měkké a tvrdé materiály. Jelikož je ovšem velmi závislá na fyzikálním stavu látky (teplota, tlak, obsah příměsí, mechanické a tepelné zpracování), přičemž tyto vlivy mohou u stejné látky způsobit podstatné změny této vlastnosti.

Hodnoty remanentních indukci udávají indukci, kterou má materiál při nulové intenzitě pole. Vzorek železa u tohoto parametru výrazně převyšuje zbylá feromagnetika.

V tabulce jsou také vypsány i hodnoty B_{max} , tedy hodnoty nasycení daných feromagnetických vzorků. Oproti jiným hysterezním veličinám, nepatří tato mezi strukturně citlivé, ale jsou v úzkém vztahu s chemickým složením. Je patrné, že vzorek železa svou hodnotou nasycení vysoce převyšuje zbylé feromagnetické vzorky.

Závěr

Jak již bylo blíže popsáno, cílem této práce bylo analyzovat magnetické vlastnosti základních feromagnetických materiálů (železa, kobaltu a niklu) a porovnat s teoreticky známými vlastnostmi dříve zjištěných a uvedených v určité literatuře. Při vlastním řešení práce a měření jednotlivých vzorků bylo dbáno na vyjádření vlivu frekvence a maximální intenzity magnetického buzení na výsledné magnetické vlastnosti těchto materiálů.

Vzhledem k tomu, že přesnost měření je ovlivněna mnoha faktory, například tvarem vzorku, poruchami ve struktuře, rovnoměrností rozložení vinutí apod., vyskytují se ve výsledcích odchylky od teoretických předpokladů. Chyba měření je však u vzorku Fe, Ni, Co malá přibližně do 5%, větší vliv na odchylky od hodnot uváděných pro stejné materiály v literatuře má vlastní výroba materiálů, způsob tavení, obsah drobných příměsí a mechanické namáhání. V tomto směru by přineslo velký pokrok provedení následné spektrální analýzy těchto vzorků, poté by bylo možno přesněji definovat vliv ostatních příměsí na specifické vlastnosti. Výsledky by bylo možno také upřesnit měření na sériích pro případné vyloučení chyby způsobené vadami v určitých místech materiálu.

I přes určité odchylky od teoretických předpokladů lze říci, že byly prokázány feromagnetické vlastnosti jednotlivých vzorků.

Kromě klasických feromagnetických materiálů byly podrobeny analýze i vzorky titanu a nikl – titanu, jejichž zařazení do měření mělo za cíl poukázat na významný rozdíl v magnetických vlastnostech oproti látkám čistě feromagnetickým.

V práci je poukázáno i na podíl způsobu výroby na vlastnosti daného materiálu. Konkrétně použitím dvou vzorků niklu, přičemž pro každý byl použit jiný výrobní postup. Jeden vzorek niklu vytvořený plazmovou technologií a druhý vytvořený elektrochemickou cestou. Z výsledků měření je zcela zřejmé jak zásadně může způsob výroby materiálu ovlivnit jeho magnetické vlastnosti a je tedy nutné v případě technologického využití takovýchto materiálu tyto vlivy vzít v potaz.

Vlastní přínos spočíval zejména v možnosti využití moderních analytických přístrojů k analýze materiálů, od nichž se očekávají specifické magnetické vlastnosti. Systémy měření REMACOMP a REMAGRAPH, jež se mimo laboratoř VŠB – TU Ostrava v naší republice nevyskytují, umožňují poměrně rychlé zjištění magnetických vlastností daného materiálu a mohou být tedy využity nejen k vědeckým účelům, ale také například k optimalizaci výrobního postupu při výrobě konkrétních magnetických materiálů.

Seznam použitých zdrojů

- [1] DRAXLER, K. - KAŠPAR, P. - RIPKA, P. *Magnetické prvky a měření*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. 276 s. ISBN 80-01-01909-8
- [2] BROŽ, Jaromír. *Moderní problémy feromagnetismu*. Praha: Nakladatelství ACADEMIA, 1962. 192 s.
- [3] REINBOTH, Hermann. *Vlastnosti a použití magnetických materiálů*. Přel. Z. Tischer. Praha: SNTL, 1975. 512 s.
- [4] MAREK, Martin. *Způsoby zjišťování magnetických vlastností konstrukčních materiálů, specifické příklady užití a aplikací magnetických měření*. Ostrava, 2005. 108 s. Disertační práce na Fakultě elektrotechniky a informatiky VŠB – TUO na katedře elektrických strojů a přístrojů. Školitel Doc. Ing. Karel Chmelík.
- [5] PÍŠEK, F., et al. *Nauka o materiálu 1, Nauka o kovech 3. svazek: Neželezné kovy*. Praha: ACADEMIA, 1973. 595 s.
- [6] PÍŠEK, F., et al. *Nauka o materiálu 1, Nauka o kovech 4. svazek: Železo a jeho slitiny*. Praha: ACADEMIA, 1975. 542 s.
- [7] *Laboratoř magnetických měření* [online]. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, katedra elektroenergetiky, aktualizováno 17. 11. 2008 [cit. 2010-03-28]. Dostupný na WWW: <http://fei1.vsb.cz/kat453/www453/soubory/MAG_LAB/index.htm>
- [8] *Technické vybavení katedry* [online]. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, katedra neželezných kovů, rafinace a recyklace. c2007 [cit. 2010-03-30]. Dostupný na WWW: <<http://katedry.fmmi.vsb.cz/637/veda.html>>
- [9] MIKULČÁK, J., et al. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1979. 348 s.

Seznam příloh na CD

DC stacionární charakteristiky:

- příloha č. 1: Stacionární charakteristiky: Vzorek X
- příloha č. 2: Stacionární charakteristiky: Kobalt (Co)
- příloha č. 3: Stacionární charakteristiky: Titan (Ti)
- příloha č. 4: Stacionární charakteristiky: Nikl (Ni)
- příloha č. 5: Stacionární charakteristiky: Nikl – titan (NiTi)
- příloha č. 6: Stacionární charakteristiky: Železo (Fe)

AC dynamické, magnetovací a μ_r charakteristiky:

- příloha č. 7: Dynamické, magnetovací a μ_r charakteristiky: Vzorek X
- příloha č. 8: Dynamické, magnetovací a μ_r charakteristiky: Kobalt (Co)
- příloha č. 9: Dynamické, magnetovací a μ_r charakteristiky: Titan (Ti)
- příloha č. 10: Dynamické, magnetovací a μ_r charakteristiky: Nikl (Ni)
- příloha č. 11: Dynamické, magnetovací a μ_r charakteristiky: Nikl – titan (NiTi)
- příloha č. 12: Dynamické, magnetovací a μ_r charakteristiky: Železo (Fe)
- příloha č. 13: Dynamické, magnetovací a μ_r charakteristiky: Nikl – elektrolytický (Ni)